

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Numerické modelování proudění chladicího média při ochlazování
horkovzdušného šoupátka**

**Numerical Modeling of the Cooling Medium Flow During Cooling of the Hot
Air Slide**

Student:

Bc. Vojtěch Trušina

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Trušina**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T043 Hydraulika a pneumatika
Téma: Numerické modelování proudění chladícího média při ochlazování
horkovzdušného šoupátka
Numerical Modeling of the Cooling Medium Flow During Cooling
of the Hot Air Slide
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Rešerše odborné literatury zabývající se požadovaným tématem.
- 2) Definice vhodného CFD modelu včetně přenosu tepla při chlazení.
- 3) Aplikace matematického modelu proudění na horkovzdušné šoupátko s využitím software ANSYS Fluent.
- 4) Vyhodnocení výsledků matematického modelování.
- 5) Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

ANSYS *Fluent Theory Guide* ANSYS 18. ANSYS Inc., 2017, p. 465.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., LAVINE, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John & Wiley Sons, 2006, p. 997, ISBN 0-471-45728-0.

KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění FLUENT, CFX*. VŠB-TU Ostrava, 2008, p. 142.
<<http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Fluent.pdf>>.

KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. VŠB-TU Ostrava, 2011, p. 174, ISBN 978-80-248-2491-8. <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Modelovani_prenosu_tepla_hmoty_a_hybnosti-KOZUBKOVA.pdf>.

PŘÍHODA, M. *Sdílení tepla a proudění*. VŠB-TU Ostrava, 2008, p. 177.

HALFAR, J., VAŠÍČEK, V. *Horkovzdušné šoupátko C63.6 113 typ 136 – technická zpráva*. ARMATURY Group a.s., 2009, p. 26.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018

Kašmír Vojtěch
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́една́но, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́една́но, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Vojtěch Trušina

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bezručova 42, Kravaře 747 21

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TRUŠINA, V. *Numerické modelování proudění chladicího média při ochlazování horkovzdušného šoupátka: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2018, 61s. Vedoucí práce: doc. Ing. Marian Bojko, Ph. D.

Diplomová práce je zaměřena na oblast numerického modelování proudění chladicího média při ochlazování horkovzdušného šoupátka. V úvodu jsou obecně popsány armatury. Další fáze je věnována konkrétně hutním armaturám. Popsáno je také horkovzdušné šoupátko, které je předmětem diplomové práce. V práci jsou popsány metody matematického modelování a turbulentní modely. V poslední fázi je vytvořen 3D model a výpočetní síť s definovanými okrajovými podmínkami a aplikací matematického modelu na proudění v horkovzdušném šoupátku. Výsledky matematického modelování jsou uvedeny na obrázcích, nebo číselně.

Klíčová slova: Horkovzdušné šoupátko, 3D model, chlazení, hutní armatury

ANNOTATION OF MASTER THESIS

TRUŠINA, V. *Numerical Modeling of the Cooling Medium Flow During Cooling of the Hot Air Slide: Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2018, 61 pages. Supervisor: doc. Ing. Marian Bojko, Ph. D.

The thesis deals with numerical modeling medium flow during cooling of hot air slide. In the introduction, the valves are generally described. The next phase is devoted specifically to metallurgical valves. Also described is the hot air slide, which is the subject of the diploma thesis. The thesis describes methods of mathematical modeling and turbulent models. In the last phase, a 3D model and computing network with defined boundary conditions and the application of a mathematical model for flow in the hot air outlet are created. The mathematical modeling results are shown in figures or numerals.

Key words: Hot Air Slice, 3D model, cooling, metallurgical valves

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Marianu Bojkovi, Ph. D. a panu Halfarovi z firmy Armatury Group a.s. za ochotu, vstřícnost a cenné odborné rady při řešení diplomové práce.

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Charakteristika hutních armatur	12
2.1	Konstrukce horkovzdušného šoupátka	14
3.	Teorie numerického modelování.....	20
3.1	Rovnice kontinuity	22
3.2	Navierova – Stokesova rovnice	24
3.3	Rovnice energie	26
3.4	Turbulence	26
3.5	Charakteristika matematických modelů	27
4.	Aplikace matematického modelu na proudění horkovzdušným šoupátkem.....	31
4.1	Model horkovzdušného šoupátka	31
4.2	Tvorba výpočetní sítě	34
4.3	Definice okrajových podmínek.	38
4.4	Charakteristika materiálových vlastností	40
4.5	Vyhodnocení matematického modelování	43
5	Závěr	53
6	Seznam použité literatury/zdroje.....	55
7	Seznam příloh.....	55

Seznam použitých veličin

Veličina	Popis veličiny	Jednotka
a_0	zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
c_p	měrná tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
d_h	hydraulický průměr	$[\text{m}]$
E	energie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
F_s	síla setrvačná	$[\text{N}]$
F_o	síla objemová	$[\text{N}]$
F_p	síla tlaková	$[\text{N}]$
F_t	síla třecí	$[\text{N}]$
k	kinetická energie turbulence	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
M	molární hmotnost	$[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
Q_m	hmotnostní průtok	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_v	objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
R	univerzální plynová konstanta	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Re	reynoldsovo číslo	$[1]$
S	plocha	$[\text{m}^2]$
S_h	konstanta	$[1]$
T	teplota	$[^\circ\text{C}]$
T_{vstup}	střední hodnota vstupní teploty	$[^\circ\text{C}]$
$T_{\text{výstup}}$	střední hodnota výstupní teploty	$[^\circ\text{C}]$
ΔT	rozdíl středních hodnot teploty	$[^\circ\text{C}]$
T_{abs}	absolutní teplota	$[\text{K}]$
\vec{u}	vektor střední rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u	rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u_{vstup}	střední hodnota vstupní rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$u_{\text{výstup}}$	střední hodnota výstupní rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
Δu	rozdíl středních hodnot rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
V	objem	$[\text{m}^3]$
v_s	střední rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
α	součinitel přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

ν	kinematická viskozita	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
ρ	měrná hmotnost	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
τ	napětí	$[\text{Pa}]$
$\bar{\tau}$	tenzor vazkých napětí	$[\text{Pa}]$
μ_t	turbulentní viskozita	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$

1. Úvod

Zadáním diplomové práce je numerické modelování proudění vzduchu horkovzdušným šoupátkem při jeho chlazení. Téma diplomové práce je konkrétní zadáním z praxe od firmy Armatury Group a.s. Cílem diplomové práce je definování a následná aplikace matematického modelu včetně přenosu tepla s využitím softwaru ANSYS Fluent.

Úvodní kapitola je věnována charakteristice hutních armatur. Uveden je obecný popis hutních armatur, konstrukce, použití a jejich základní rozdělení. Uvedeny jsou také vybrané typy hutních armatur, včetně jejich základního popisu. Dále je popsána konstrukce, která je současně vyobrazena na obrázcích.

Následující kapitola je zaměřena konkrétně na horkovzdušné šoupátko, které je předmětem zadání diplomové práce. Uveden je základní popis horkovzdušného šoupátka, použití v praxi, způsob a řešení chlazení a také jeho konstrukce s použitými materiály.

Třetí kapitola popisuje teorii numerického modelování. Jsou definovány základní metody numerického modelování. Tyto metody jsou následně popsány. Dále jsou definovány základní vztahy vyjadřující rovnici kontinuity, Navierovy – Stokesovy rovnice a rovnici energie. Následně je charakterizována problematika turbulence. Na závěr je uvedeno rozdělení matematických modelů a poslední fázi této kapitoly je věnována turbulentním modelům, jejich rozdělení, základnímu popisu a použití.

Poslední kapitola je věnována aplikaci matematického modelu na proudění horkovzdušným šoupátkem. V první fázi je uveden postup tvorby a úpravy 3D model, na model který byl vhodný k tvorbě výpočetní sítě. V následující fázi je popsána tvorba výpočetní sítě s nutnými úpravami kontaktů mezi styčnými plochami. V další fázi jsou stanoveny a definovány okrajové podmínky, spolu s definicí fyzikálních vlastností použitých materiálů. Nakonec jsou vyhodnoceny výsledky matematického modelování. Výsledky byly vyhodnoceny jak graficky, tak číselně pomocí středních hodnot.

2. Charakteristika hutních armatur

Obecně armatury jsou příslušenství a pomocná zařízení systémů a mechanismů, které pracují s průtokem kapalin, plynů nebo par. Armatury slouží nejčastěji k přerušování a regulaci průtoku dopravované látky, nebo k úplnému uzavření dopravované látky v potrubí. Dále slouží k ochraně potrubí před nadměrným a nebezpečným stoupnutím tlaku, či teploty dopravované tekutiny, nebo ke kontrole a měření průtoku, tlaku či teploty pracovní látky. Armatury se dělí na regulační a uzavírací, armatury pojistné a ochranné a armatury kontrolní a měřicí. Podle dalšího vedlejšího rozdělení se dělí na hutní. [7]

Tento typ armatur (hutní) se vyrábí pro různé funkce a pro různé podmínky. Každý jednotlivý typ těchto armatur je vyráběn pro jiné teplotní či tlakové podmínky v provozu. Některé mají funkci pojistného tlakového ventilu, jiné zase tlak řídí. Dále zde spadají armatury, které slouží pouze jako uzavírací ventily a armatury, jejichž funkce je škrcení či regulace průtoku potrubím.

Konstrukce armatur je poměrně masivní, protože se vyrábějí pro velké světlosti, které se pohybují v rozmezí od 200 mm až do 2400 mm. Jejich konstrukce musí být navržena tak, aby odolala vysokým teplotám. Většina z těchto armatur pracuje v těžkých podmínkách a při vysokých teplotách, proto se u hutních armatur používají žáruvzdorné a tepelně izolační materiály. Pracovní teploty se pohybují od 200 °C, až po 1400 °C. [1]

Funkci pojistného ventilu vykonává bezpečnostní klapka (C65.2 111 TYP 110 AG), která se používá pro plynová potrubí, kdy v případě zvednutí, nebo poklesu tlaku a překročení předem nastavených hodnot dojde k uzavření této klapky. Používá se v případě proudění neagresivních plynů, viz Obr. 2.1. [1]

Ekologické brýlové šoupátko (C62.2 113 TYP 129 BE AG) plní funkci uzavíracího ventilu. Je používán pro vysokopecní, konvertorový a koksárenský plyn v plynovodech, viz Obr. 2.2. [1]

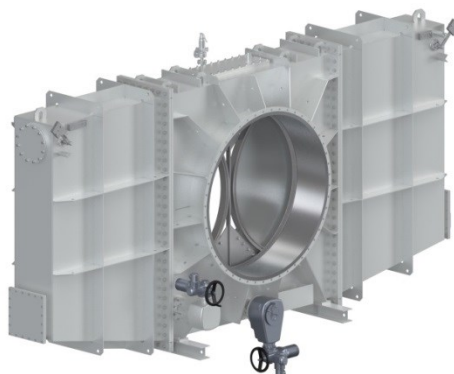
Funkci uzavíracího ventilu plní také uzavírací klapka (C61.3 113 TYP 140 AG), která slouží k úplnému uzavření nebo otevření průtoku proudícího média, viz Obr. 2.3. Jako proudící média jsou pro tuto klapku předepsány neagresivní kapaliny a plyny jako zemní plyn, koksárenský plyn, ropné produkty, vzduch apod. [1]

V přírodním potrubí pro dopravu studeného vzduchu k ohřívací vzduchu se používá škrtková klapka (C60.2 413 TYP 128 AG), která je vybavena odpouštěcím zařízením SNORT, viz Obr. 2.4. [1]

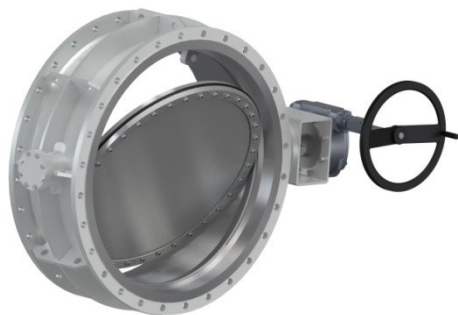
Horkovzdušné šoupátko (C63.6 113 TYP 136 AG), které je předmětem diplomové práce, se používá u ohřívačů vzduchu vysokých pecí v potrubí, kde proudí vzduch o teplotě 1400 °C, viz [1] Obr. 2.5. Více o konstrukci a použití horkovzdušného šoupátka v kapitole 2.1 [1]



Obr. 2.1 Bezpečnostní klapla [1]



Obr. 2.2 Ekologické brýlové šoupátko [1]



Obr. 2.3 Uzavírací klapka [1]



Obr. 2.4 Škrťací klapka [1]

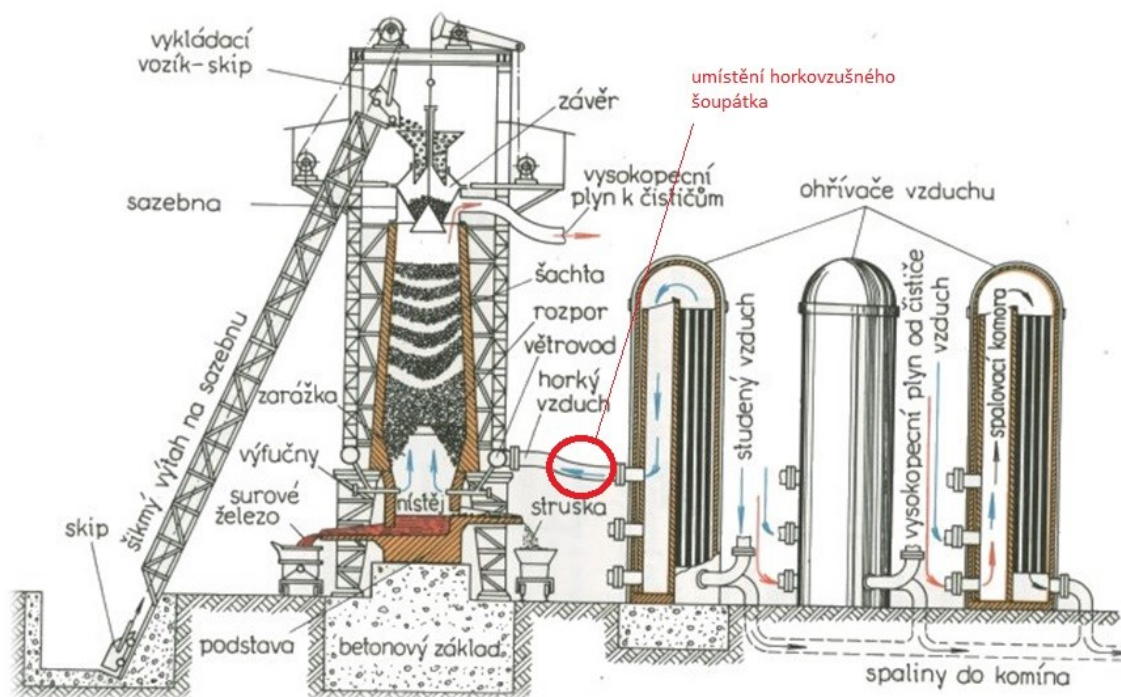


Obr. 2.5 Horkovzdušné šoupátko [1]

2.1 Konstrukce horkovzdušného šoupátka

Zadání diplomové práce je numerické modelování proudění horkovzdušným šoupátkem. Tato podkapitola je zaměřena na jeho funkci, konstrukci a použití.

Horkovzdušné šoupátko se používá jako uzavírací ventil v horkovzdušném potrubí u ohřivačů vzduchu vysokých pecí. V horkovzdušném potrubí se toto šoupátko nachází mezi vysokou pecí a ohřivači vzduchu jak je uvedeno na Obr. 2.6. Při žhavení vysoké pece je horkovzdušné šoupátko otevřeno, po skončení žhavení se šoupátko uzavírá.

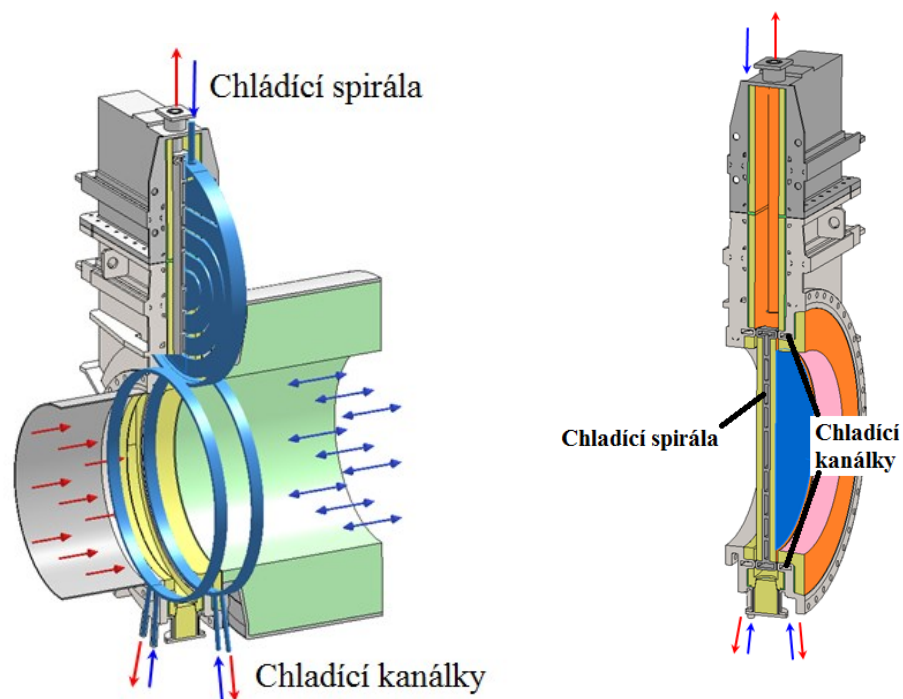


Obr. 2.6 Umístění horkovzdušného šoupátka [1]

Horkovzdušné šoupátko má svařovanou konstrukci, kterou před ztrátou tepla v potrubí a přílišnému ohřátí šoupátka zabráňuje žáruvzdorná vyzdívka. Těleso je chlazeno průtočným způsobem, chlazeny jsou chladicí kanály a těsnící deska upravenou čistou vodou, viz Obr. 2.7. Speciální ucpávka, která je součástí víka, těsní zvedací tyče. Pomocí protizávaží je realizováno zvedání těsnící desky. Nosnou konstrukci horkovzdušného šoupátka lze demontovat bez nutnosti demontáže chladících hadic.

Horkovzdušné šoupátko je ovládáno čelní převodovkou a víceotáčkovým elektropohonem. Při výpadku proudu je možné použít nouzové ovládání pomocí ručního kola na elektropohonu.

Horkovzdušné šoupátko je možné montovat pouze do vodorovného potrubí a s přírubovým připojením. [1]

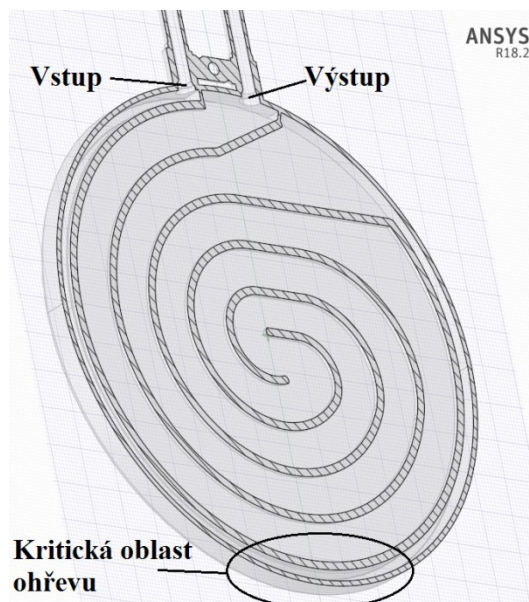


Obr. 2.7 Chlazení horkovzdušného šoupátka v otevřené poloze (vlevo) a při zavřené poloze (vpravo) [1]

Oblasti chlazení

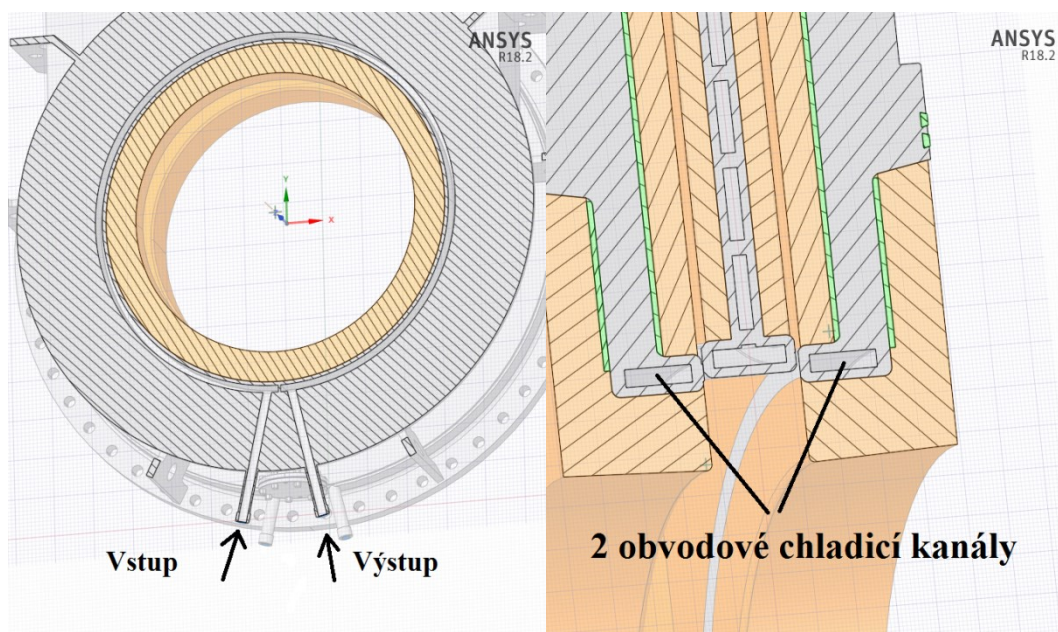
Chlazeny jsou u horkovzdušného šoupátka jejich ocelové části pomocí chladících kanálů a chladicí spirály (uzavíracího šoupátka), jak je patrné z Obr. 2.7.

Ke chlazení těsnicí desky neboli uzavíracího šoupátka, dochází pomocí chladicí spirály. Vstup chladicí kapaliny je na níže uvedeném obrázku uveden vlevo, viz obr. 2.8. Chladicí kapalina vstupuje do spirály na okraji těsnicí desky z toho důvodu, že musí při své vstupní teplotě (40 °C) primárně chladit nejvíce tepelně namáhanou oblast, která je uvedena na Obr. 2.8. V této oblasti dochází v otevřené poloze horkovzdušného šoupátka k přímému styku s horkým vzduchem.



Obr. 2.8 Proudění chladicí kapaliny ve spirále

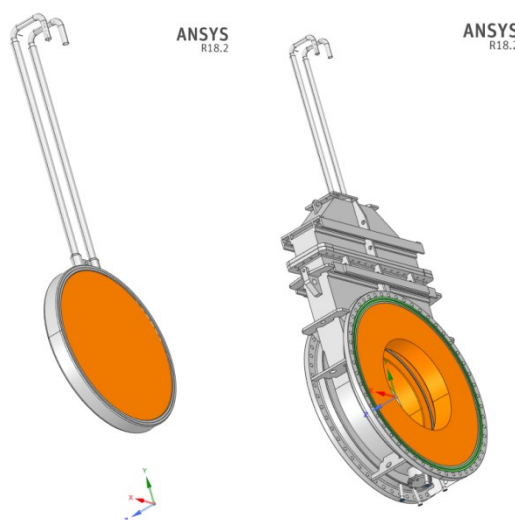
Ke chlazení ocelového tělesa dochází pomocí dvou chladících obvodových kanálů, Obr. 2.9. Chladicí kanály mají za úkol chránit celé ocelové těleso před vysokým nárůstem teploty, která u ocelových a kovových součástí nesmí překročit hranici 350 °C. Vstupní teplota chladicí kapaliny je stejná jako u chladicí spirály a to 40 °C. Tak jako v předchozím případě, je zde ocelové těleso s přímým stykem s horkým vzduchem při otevřené poloze horkovzdušného šoupátka, viz Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Proudění chladicí kapaliny v obvodových chladících kanálech

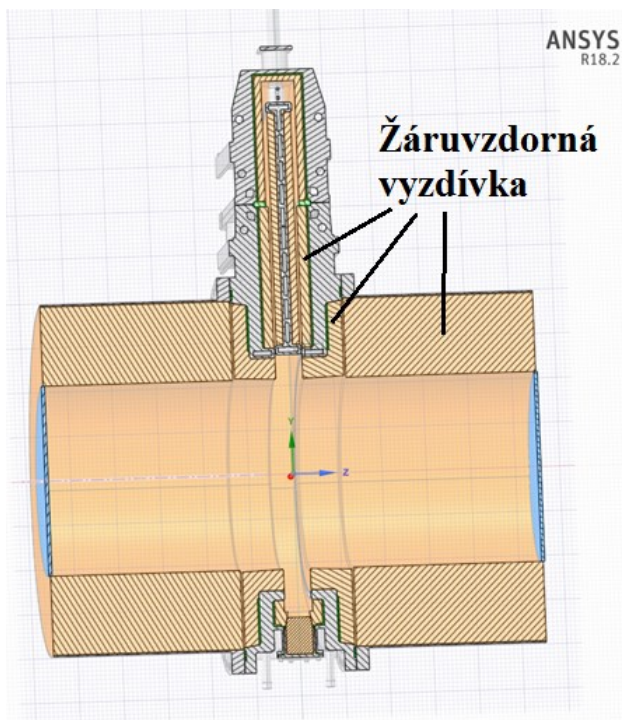
Vzhledem k vysokým teplotám vzduchu, který horkovzdušným šoupátkem prochází, musí být konstrukce šoupátka upravena tak, aby těmto teplotám odolávala.

Horkovzdušné šoupátko se skládá z ocelového krytu, ve kterém se pohybuje těsnicí deska. Tento ocelový kryt je chráněn před přílišným ohřevem pomocí speciální žáruvzdorné vyzdívky, která chrání jak ocelový kryt, tak těsnicí desku, viz Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Konstrukce horkovzdušného šoupátka (oranžová barva představuje žáruvzdornou vyzdívku)

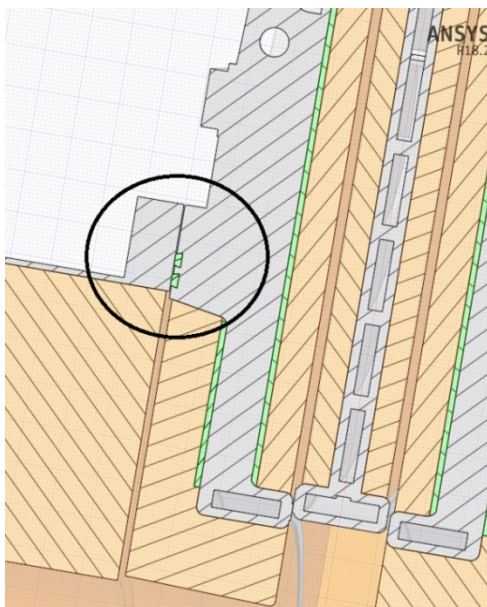
Žáruvzdorná vyzdívka se nachází jak na těsnicí desce, tak na vnitřních stěnách ocelového krytu ale také na vnitřní stěně ocelové potrubí, které přivádí horký vzduch do pece, jak uvedeno na Obr. 2.11.



Obr. 2.11 Žáruvzdorná vyzdívka

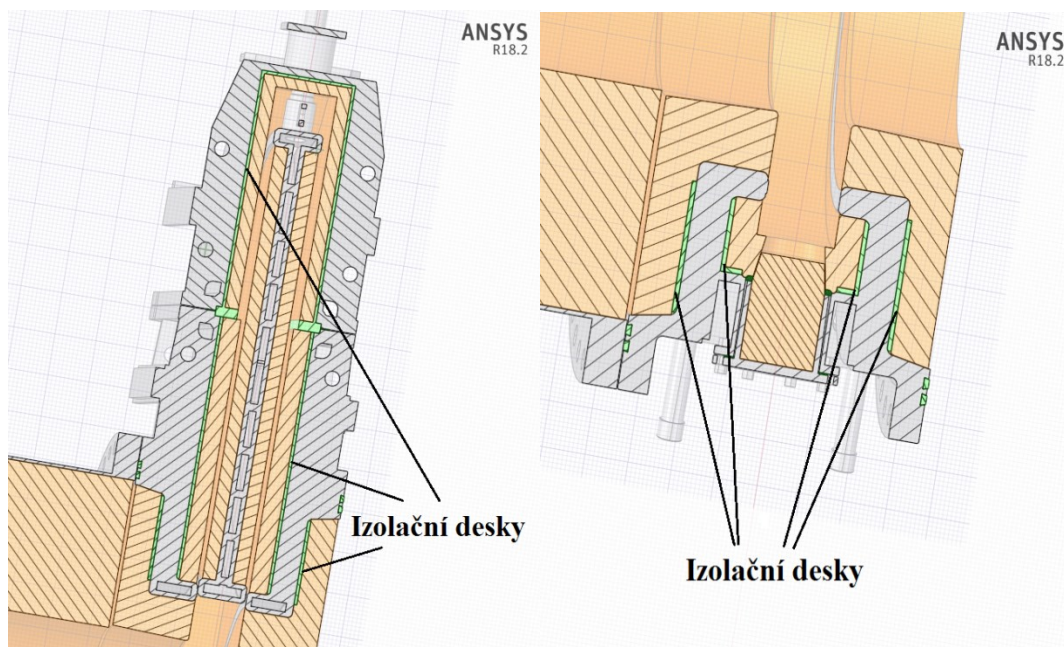
Mezi jednotlivými styčnými plochami mezi tělesy horkovzdušného šoupátka se nachází různé těsnící kroužky, nebo těsnící a izolační desky. Jedním z použitých materiálů je PROMAFORM – 1430.

Mezi ocelovým krytem horkovzdušného šoupátka a potrubní přírubou jsou umístěny dva těsnící kroužky, které jsou vyobrazeny na Obr. 2.12.



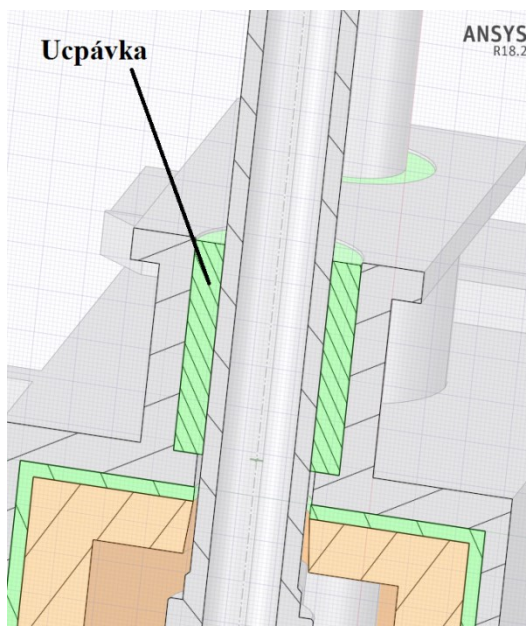
Obr. 2.12 Umístění těsnících kroužků

Mezi žáruvzdornou vyzdívkou a ocelovým krytem se nachází izolační desky, které zamezují přílišnému ohřevu ocelových částí, viz Obr. 2.13.

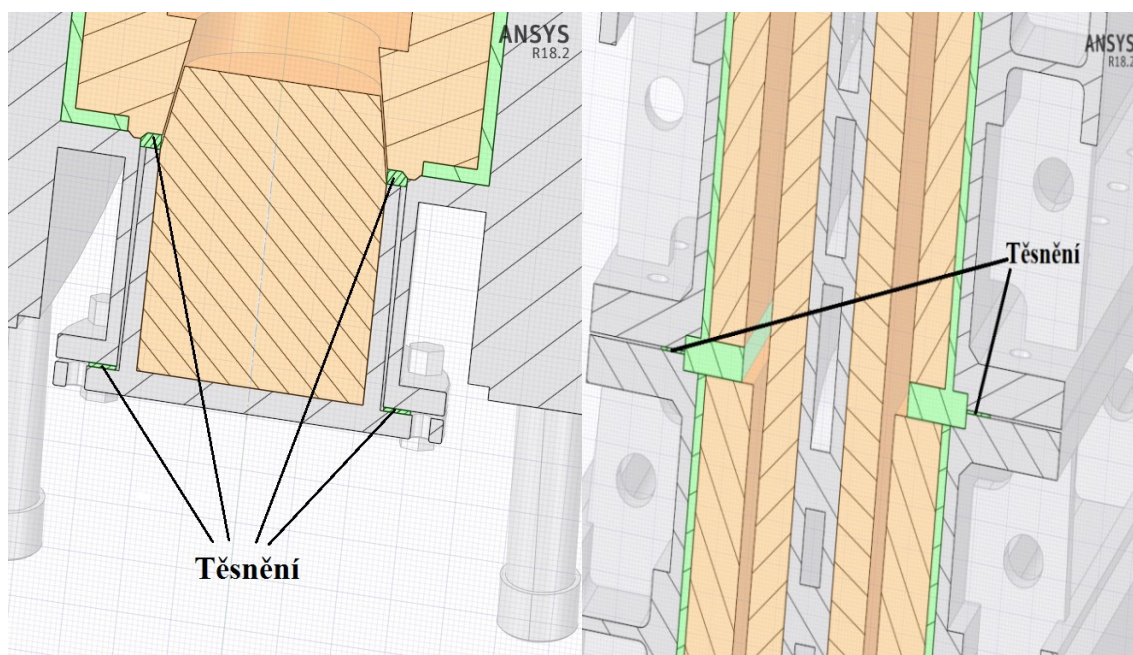


Obr. 2.13 Umístění izolačních desek

Dále se v horkovzdušném šoupátku nachází dvě ucpávky u otvorů pro zvedací tyče, viz Obr. 2.14. Na styčné ploše mezi hlavní částí a víkem horkovzdušného šoupátka je umístěno jednoduché těsnění, další dvě těsnění se nachází u spodního víka, které jsou uvedeny na Obr. 2.15.



Obr. 2.14 Umístění ucpávky



Obr. 2.15 Umístění těsnění

3. Teorie numerického modelování

Ze zákonů bilance fyzikálních veličin vychází všechny zákony mechaniky tekutin. Tyto zákony bilance mohou být zapsány lokálně, to odpovídá bilanci hmoty, hybnosti, energie apod. malého objemu kontinua, nebo mohou být zapsány globálně (integrálně). U globálního zapsání je bilance uvažovaných veličin brána pro celé těleso (celý systém). Z výše uvedených dvou způsobů formulace plyne následující rozdělení dvou základních typů numerických metod:

- Metody vycházející z lokální formulace zákonů – jedná se o metodu sítí neboli metodu konečných diferencí. Vychází především z parciálních diferenciálních rovnic s definovanými počátečními okrajovými podmínkami. V těchto metodách je derivace hledané funkce nahrazena diferencí. Za výhodu této metody se považuje její jednoduchost při sestavování soustavy algebraických rovnic pro hodnoty hledané funkce v nódech. Při řešení komplikovaných oblastí, či komplikované geometrie, nebo v případech, kdy hledané funkce vykazují velké gradienty, nastává u těchto metod problém, protože přesnost aproximace jak tvaru oblasti, tak řešení výrazně klesá a je třeba navrhnout jinou numerickou metodu.
- Metody vycházející z integrální (globální) formulace zákonů – u těchto metod je nejvýhodnější použití té metody, která vychází z nějakého variačního principu (Ritzova-Galerkinova metoda). Jedná se převážně o metody konečných objemů a metody konečných prvků. Tyto metody odpovídají fyzikální představě měření. Řešení je aproximováno polynomem s příslušným množstvím neznámých parametrů. Parametry jsou určovány tak, aby chyba „vážená“ pomocí váhové funkce byla minimální. Řešená oblast se rozděluje na menší podoblasti (tzv. konečné prvky), z důvodu lepší aproximace jak řešení, tak i řešené oblasti a příslušných okrajových a počátečních podmínek. Známost aproximace řešené oblasti i hledaného řešení je považována za největší výhodu této metody. Sestavování výchozí soustavy rovnic může být relativně komplikované a dá se považovat za nevýhodu těchto metod, ale užitím samočinných počítačů tato potíž opadá. [2]

Hlavním znakem numerické metody je konvergence k nejpřesnějšímu (fyzikálně nejvěrohodnějšímu) řešení. Někdy je složité rozhodnout, zda získané nestabilní řešení je způsobeno fyzikální povahou problému, nebo nestabilním numerickým postupem. Jako příklad zde slouží porušení Courantova kritéria stability numerického řešení, kde toto kritérium dává do relace fyzikální vlastnosti kontinua a velikost prostorového dělení a časového kroku. Jestli není kritérium splněno, pak je daný numerický postup nestabilní i v tom případě, že při vhodnější volbě sítě a časového kroku jeho stabilní řešení existuje. Tento problém může nastat například u řešení nelineárních hyperbolických problémů, kde k nestabilitě dochází kvůli diskretizaci systému, díky které se značně změnili jeho vlastnosti. Tyto poruchy způsobené diskretizací se při nevhodné volbě sítě a časového kroku v průběhu výpočtu netlumí, naopak zesilují. Zabránění tohoto problému předejdeme zavedením matematického tlumení do příslušného modelu. Toto matematické tlumení má fyzikální analogii ve viskozitě či difuzivitě. [2]

Numerické metody rozdělujeme na tři typy:

- Metoda konečných prvků (MKP)
- Metoda konečných objemů (MKO)
- Metoda konečných diferencí (MKD)

Jednotlivé metody jsou vázány na jeden konkrétní typ formulace úlohy. Metoda konečných prvků souvisí s integrální (globální) formulací, kde se řeší integrace přes malou část řešené oblasti (hraniční prvek) a ta je nahrazena integrací přibližnou (numerickou), tedy součtem.

Z integrálního zápisu řešeného problému vychází rovněž metoda konečných objemů. Pomocí Stokesovy věty je přes časoprostorový objem definována integrace po jeho povrchu. Jedná se o numerickou realizaci bilance daných veličin, nejčastěji se jedná o hmotnost, hybnost, energii apod.

Na lokální (diferenciální) formulaci je vázána metoda konečných diferencí, kde je lokální formulace nahrazena derivací přibližnou, čili diferencí, konečným rozdílem. Jinými slovy, jedná se o bilanci příslušných veličin v bodě.

Podle kvality řešení lze rovnice mechaniky tekutin rozdělit do třech základních typů. Kvalita řešení se určuje podle toho, zda v řešené oblasti existují reálné křivky (charakteristiky), podél kterých je řešení a jeho derivace vzájemně závislé či nikoliv. [2]

Podle toho se rozlišují rovnice:

- Eliptické – u této rovnice neexistují reálné charakteristiky. Bývá například u nestlačitelného proudění, nebo u stacionárního vedení tepla, apod.
- Parabolické – existuje pouze jedna reálná charakteristika. Vyskytuje se u nestacionárního vedení tepla, nebo u proudění nestlačitelné vazké tekutiny, apod.
- Hyperbolické – u této rovnice existují dvě reálné charakteristiky (pouze v dvourozměrném případě), nebo charakteristické plochy (v trojrozměrném případě). Nastává při šíření elastických vln, nestacionární proudění nevazké tekutiny, apod. [2]

3.1 Rovnice kontinuity

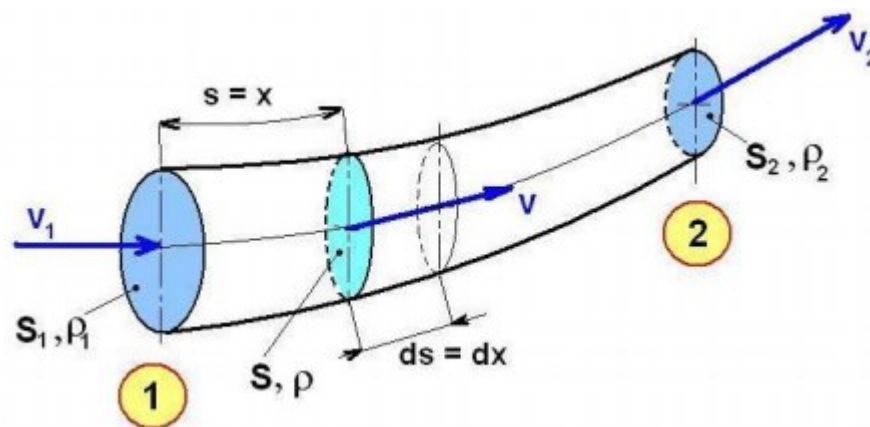
Rovnice kontinuity neboli rovnice spojitosti, popisuje obecný fyzikální zákon o zachování hmotnosti. Tekutina proudící elementárním objemem musí mít konstantní hmotnost ($m = konst.$). Celková změna hmotnosti musí být nulová ($dm = 0$). Tuto celkovou změnu hmotnosti můžeme rozdělit na lokální a konvektivní. U lokální (časové) změny hmotnosti probíhá změna v elementárním objemu samém (dojde ke stlačování nebo rozpínání kapaliny). Rozdílem hmotnosti přitékající a vytékající tekutiny z elementárního objemu je způsobena konvektivní změna. Součet těchto zmíněných dvou změn (lokální a konvektivní) je roven nule.

Druhá možná definice rovnice kontinuity zní takto: rozdíl vstupujících hmotností do kontrolního objemu a vystupujících hmotností z kontrolního objemu je roven hmotnosti akumulované v tomto kontrolním objemu. V praxi se můžeme setkat se dvěma případy a to rovnice kontinuity pro jednorozměrné proudění a rovnice kontinuity pro rovinné či prostorové proudění. [3]

Rovnice kontinuity pro jednorozměrné proudění:

Jednorozměrným prouděním uvažujeme neustálené proudění stlačitelné tekutiny proudovou trubicí s proměnným průřezem, která je na Obr. 3.1. Z této elementární trubice s proměnným průřezem se vytkne elementární část ohraničená vstupním průřezem S a elementární délkou ds . Kontrolní elementární objem představuje válec, kterým protéká tekutina, plášť tohoto válce je tvořen proudnicemi. Tok touto částí válce je nulový, protože platí $v_n = 0$ po celém plášti kontrolního válce. V průřezu proudové trubice uvažujeme s rovnoměrným rozložením průběhu rychlosti. Pokud průběh

rychlosti na průřezu proudové trubice není rovnoměrné rozložení, uvažujeme se střední rychlosti. [4]



Obr. 3.1 Jednorozměrné proudění tekutiny [4]

Po integraci platí pro proudovou trubici

$$Q_m = \rho S v = \text{konst.} \quad (3.1)$$

Kde Q_m je hmotnostní průtok neboli hmotnost tekutiny proteklé za jednotku času ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$). Jelikož rovnice (3.1) musí platit pro všechny body kontrolní proudové trubice, proto pro rovnici kontinuity platí

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 = \rho S v = \text{konst.} \quad (3.2)$$

Pro nestlačitelné kapaliny je hustota konstantní ($\rho = \text{konst.}$), rovnice se zjednodušuje na tvar

$$Q_v = S v = \text{konst.} \quad (3.3)$$

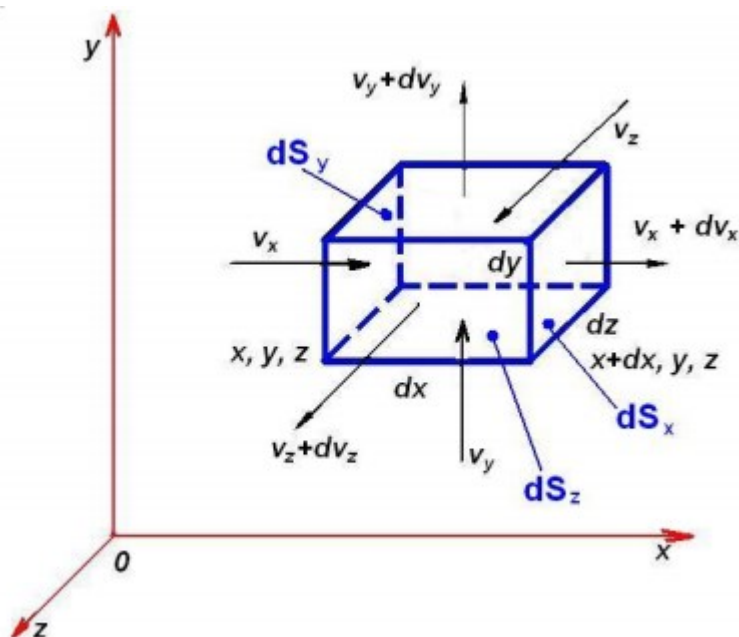
Kde veličina Q_v znamená objemový průtok neboli objem kapaliny proteklý za jednotku času – $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Stejně jako u hmotnostního průtoku při nerovnoměrném rozložení průběhu rychlosti na průřezu proudové trubice, musíme dosadit do rovnice kontinuity střední rychlosti podle průtoku, určené vztahem

$$v_s = \frac{1}{S} \int_S v dS \quad (3.4)$$

Rovnice kontinuity pro prostorové proudění

Pro prostorové proudění a jeho odvozování rovnice kontinuity vycházíme z vytknutí kontrolní oblasti ve tvaru hranolu v proudovém poli tekutiny o stranách dx , dy , dz a o objemu $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ (viz Obr. 3.2). Tekutina tímto kontrolním hranolem protéká rychlostí se složkami ve směru tří souřadných os x , y , z , které jsou kolmé na elementární

plochy kontrolního hranolu. Z důvodu uvažování zachování konstantní rychlosti průtoku elementárními ploškami se kontrolní objem hranolu volí velmi malý. [4]



Obr. 3.2 Prostorové proudění tekutiny [4]

Pro neustálené prostorové proudění stlačitelné tekutiny má rovnice kontinuity tvar

$$\frac{D\rho}{Dt} + \left(\rho \frac{\partial V_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial V_y}{\partial y} + \rho \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = \frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} v = 0 \quad (3.5)$$

Pro ustálené proudění se rovnice zjednoduší tak, že musí být $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ z důvodu neměnicích se daných veličin v čase. Rovnice kontinuity má pak tvar

$$\operatorname{div} (\rho v) = 0 \quad (3.6)$$

U nestlačitelných kapalin ($\rho = \text{konst.}$) je rovnice kontinuity vyjádřena vztahem

$$\operatorname{div} v = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

3.2 Navierova – Stokesova rovnice

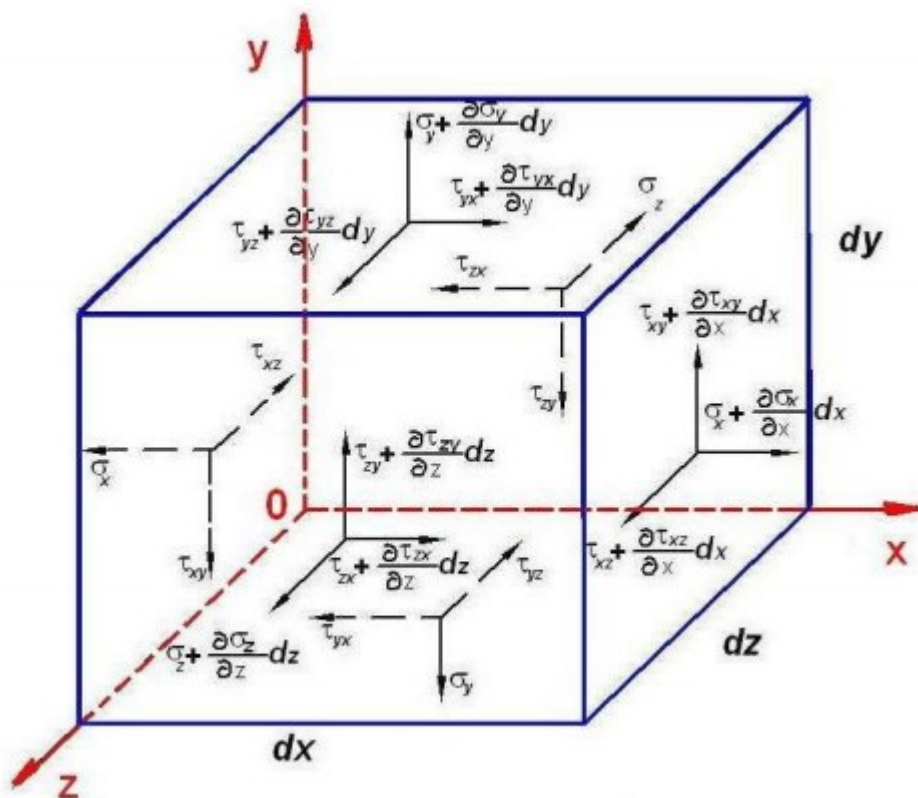
Navierova – Stokesova rovnice vyjadřuje rovnováhu sil při proudění skutečné tekutiny. Jedná se kromě sil vnějších, tlakových a setrvačných spojených s vlastním pohybem částic tekutiny také o třecí síly, které vznikají viskozitou tekutiny. Tyto třecí síly lze vyjádřit matematicky pomocí Newtonového vztahu

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3.8)$$

Při proudění skutečné kapaliny lze rovnováha sil zapsat ve tvaru

$$F_s = F_o + F_p + F_t \quad (3.9)$$

Tečná napětí vznikají ve skutečné tekutině při vzájemném pohybu částic, tyto tečná napětí způsobují úhlovou deformaci částic. Smyková i normálová napětí působí na plochách elementárního objemu skutečné kapaliny v podobě hranolu o stranách dx , dy , dz , viz Obr. 3.3. [4]



Obr. 3.3 Napětí na elementárním objemu tekutiny [4]

V případě stanovení rovnováhy všech sil působících na elementární objem kontrolního hranolu, dostaneme Navier – Stokesovy rovnice, které mají ve vektorovém zápise (v pravoúhlém souřadném systému) tvar

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \text{grad } v = a_0 - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta v \quad (3.10)$$

Na rozdíl od Eulerovy rovnice hydrodynamiky se Navierova – Stokesova rovnice liší posledním členem pravé strany, který definuje potřebnou sílu k překonání viskózního tření tekutiny.

V případě řešení proudového pole se určuje rozložení rychlostí a tlaků, kdy vedle pohybové rovnice se uplatní i rovnice spojitosti.

V tomto systému (systém diferenciálních Navierových – Stokesových rovnic a rovnic spojitosti) máme čtyři neznámé a to složky rychlosti (v_x , v_y a v_z) a tlak p , k vyřešení těchto rovnic je potřeba znát vnější zrychlení a_0 , hustotu tekutiny ρ a okrajové podmínky. Navierovy – Stokesovy rovnice patří mezi parciální diferenciální rovnice nelineární a jsou obecně neřešitelné. Pro jednodušší případy laminárního proudění je zde možnost analytického řešení. Pro složité případy laminárního proudění jsou zde numerické metody (např. metoda konečných prvků). [4]

3.3 Rovnice energie

Z Navier- Stokesovy rovnice se odvozuje rovnice energie, pomocí skalárního násobení vektorem rychlosti a koeficientem 0,5. Po doplnění o členy vyjadřující vnitřní energii získáme vektorový tvar

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) + S_h \quad (3.11)$$

kde E je měrná energie, jenž je součtem vnitřní a kinetické energie. Veličinu λ zastupuje součinitel molekulové tepelné vodivosti a S_h jsou chemické reakce a další zdroje tepla. Po té je definována entalpie, která se liší v důsledku stlačitelných a nestlačitelných tekutin. Více o problematice rovnice energie a přenosu tepla je popsáno v literatuře [10]. [10]

3.4 Turbulence

Proudění dělíme do dvou skupin a to laminární a turbulentní. Obecně uvažujeme proudění jako turbulentní, z důvodu chaotické fluktuace v prostoru i v čase. Turbulentní proudění je sestaveno z prostorových struktur, jinými slovy turbulentních vírů. U turbulentního proudění se využívá metoda časového středování.

Okamžité hodnoty turbulentních veličin můžeme rozdělit na dvě části, část časově středovaná $\bar{\xi}$ a část fluktuační ξ' , pro tyto dvě složky platí následující vztah:

$$\xi = \bar{\xi} + \xi' \quad (3.12)$$

Reynoldsovy rovnice, charakteristické tím, že jsou formálně podobné výchozím rovnicím, získáme aplikací časového středování na rovnici kontinuity a Navierovy – Stokesovy rovnice. U Reynoldsových rovnic se na rozdíl od Navierových Stokesových pohybových rovnic vyskytuje člen, který odpovídá rozměrově napětí a je definován jako

$$\tau_{t-ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (3.13)$$

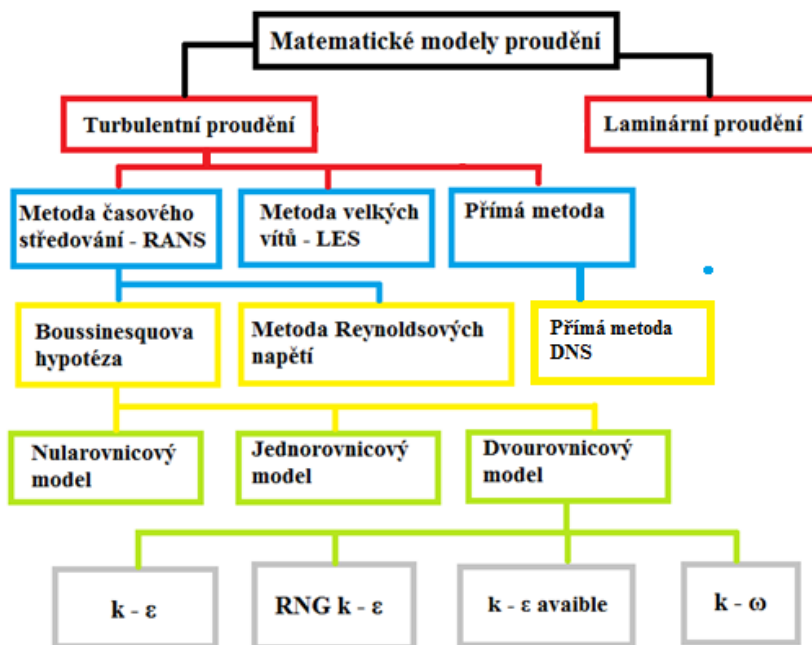
Tyto členy existují jen při turbulentním proudění a nazývají se Reynoldsova napětí (turbulentní). Projevují se deformačními účinky na elementární objem tekutiny. Tyto napětí je nutné definovat, protože jsou novými neznámými veličinami v systému rovnic. Nejpoužívanější metoda je Boussinesquova hypotéza o vírové (turbulentní) viskozitě. [10]

laminární proudění molekulová viskozita $\tau = \mu \frac{du_y}{dy}$	Boussinesquova hypotéza (analogie) \longleftrightarrow	turbulentní proudění vírová turbulentní viskozita $\tau_t = -\rho \overline{u'_x u'_y} = \mu_t \frac{\partial \overline{u}_y}{\partial y}$
----------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Obr. 3.4 Boussinesquova hypotéza [10]

3.5 Charakteristika matematických modelů

Jeden z hlavních problémů při výpočtu turbulentního smykové proudění bývá přítomnost Reynoldsova napětí v rovnicích středního pohybu tekutiny, z toho vyplývá, že systém pohybových rovnic není uzavřen tak, jako u případů s laminárním prouděním tekutiny. Model turbulence, nazýváme takový model, který tvoří soubor přídatných rovnic a empirických vztahů společně s pohybovými rovnicemi řešitelný systém rovnic. Tyto modely turbulence mohou být rozděleny do několika základních skupin, které jsou uvedeny na Obr. 3.5. [5]



Obr. 3.5 Rozdělení matematických modelů

Nularovnicový model

Tento první model, který navrhl Prandtl, popisuje rozložení turbulentní viskozity ν_t , která je vyjádřena v závislosti na střední hodnotě průběhu rychlosti ve dvourozměrné podobě.

Zejména pro modelování proudění ve smykové vrstvě jsou tyto nularovnicové modely vhodné. Jako nevýhodu či nedostatek se považuje předpoklad lokální rovnováhy, kdy produkce turbulentní kinetické energie je rovna rychlosti disipace. Tento model nepostihuje transport turbulence. [5]

Jednorovnicový model

Z důvodu možnosti postihnout transportu turbulentních parametrů, je nutné zavedení pro tyto turbulentní parametry diferenciální transportní rovnici. Pro jednoduché modely se naskytuje možnost použití transportní rovnice pro rychlostní měřítko turbulentního pohybu \sqrt{k} , kde $k = \frac{1}{2}(u_1'^2 + u_2'^2 + u_3'^2) = \frac{1}{2}u_j'^2$ je středovaná (kinetická) energie turbulentního pohybu vztažena na jednotku hmotnosti. Následně lze pro tuto kinetickou energii turbulentního pohybu (k) odvodit exaktní rovnici z Navierových – Stokesových rovnic, která obsahuje rychlost změny, konvektivní transport, turbulentní difúzi v důsledku fluktuací rychlosti a tlaku, molekulovou difúzi, produkci v důsledku smykového tření a vazkou disipaci.

Jednorovnicové modely jsou vhodné v případě, kdy lze reálně popsat rozložení délkového měřítka l , z důvodu postihnout transportu turbulence. Nejsou však vhodné v případech, kdy jde o modelování složitějších případů proudění, u kterých nelze dostatečně přesně definovat jeho rozložení pomocí empirického vztahu. V tomto bodě je nutné definice další transportní rovnice a přechod na dvourovnicový model turbulence. [5]

Dvourovnicové k- ε modely standart

Jak už bylo řečeno na konci předchozího modelu, dvourovnicový model určuje turbulentní viskozitu pomocí dvou transportních rovnic pro k a ε . Tento dvourovnicový model využívá Boussinesqovy hypotézy o vírové viskozitě a vztahuje μ_t ke k , ε a C_μ . Z Navierových – Stokesových rovnic se odvodí exaktní tvar transportní rovnice pro ε , která obsahuje komplexní korelace, které je nutné opět aproximovat. [5]

Dvourovnicový RNG $k-\varepsilon$ model

Pomocí matematického postupu renormalizačních grup (RNG) je tento model odvozen ze standart $k - \varepsilon$ modelu. Tato procedura aplikovaná na turbulenci spočívá v postupné eliminaci malých vírů, při ní dochází k přetransformování pohybové rovnice (Navierovy - Stokesovy rovnice) tak, že dochází k modifikaci turbulentní viskozity, síly a nelineárních členů. Pokud tyto víry souvisí s disipací ε , pak turbulentní viskozita μ_t je závislá na měřítku turbulentních vírů a poté tato metoda (RNG) konstruuje turbulentní viskozitu pomocí iteračního odstraňování úzkých pásem vlnových čísel.

Oproti klasickému dvourovnicovému modelu $k - \varepsilon$ je tato metoda asi o desetinu pomalejší, ovšem v oblastech zavíření je přesnější. [5]

Reynoldsov napět'ový model (RSM)

Reynoldsov napět'ový model je z výše uvedených modelů ten nejnovější, zahrnuje výpočet jednotlivých Reynoldsových napětí pomocí diferenciálních transportních rovnic. Oproti standartnímu modelu $k - \varepsilon$ se liší jinou formulací pro turbulentní viskozitu a modifikovanou transportní rovnicí pro ε , která je odvozena z exaktní rovnice pro transport střední kvadratické fluktuace vířivosti. Této metodě říká jinými slovy „Realizable“ a to z důvodu nutnosti plnění určité matematické překážky u Reynoldsových napětí v souladu s turbulentním prouděním. Jako hlavní výhoda spolu s metodou RNG je větší přesnost výpočtu pro proudění s velkým zakřiveným proudem, víry či rotacemi. Tato metoda vykazuje nejlepší výkon oproti ostatním $k - \varepsilon$ modelům, díky kterému je nejvíce doporučována. Jako nedostatek by se dal vyčíst jeho neschopnost vytvářet fyzikální turbulentní viskozitu v situacích, kdy se výpočetní oblast skládá z rotační a stacionární oblasti. [6]

Modely $k - \omega$ (Standart, SST)

Tyto dvourovnicové modely řeší podobně jako metody $k - \varepsilon$ dvě dodatečné diferenciální rovnice. Oproti rovnici pro specifickou disipaci energie pro ε má tato metoda několik výhod. Za jednu z hlavních se považuje schopnost integrovat rovnici bez dalších podmínek přes viskózní podvrstvu. Mezi další výhodu by se dala zařadit lepší predikce záporného tlakového spádu, mezní vrstvy a odtržení proudění. Standartní model a model SST se od sebe liší především v postupné změně modelu $k - \omega$ v oblastech poblíž stěn na model $k - \varepsilon$ pro vysoká Reynoldsova čísla ve vzdálené oblasti od stěn. Tento model obsahuje taky modifikovanou formulaci turbulentní viskozity včetně ohledu na transportní efekt hlavních turbulentních smykových napětí [6]

Standart $k - \omega$ model

Standartní model $k - \omega$ představuje ve FLUENTU modifikaci Wilcoxova modelu $k - \omega$, která zahrnuje modifikace pro nízká Reynoldsova čísla, stlačitelnost a smykové proudění. Jako slabina Wilcoxova modelu se dá považovat jeho citlivost při řešení hodnot k a ω ve volném proudu mimo smykové vrstvy. Standartní $k - \omega$ model tento nedostatek částečně odstraňuje, avšak může mít i nadále značný efekt při řešení volného smykového proudění. [6]

Shear-Stress Transport (SST) $k - \omega$ model

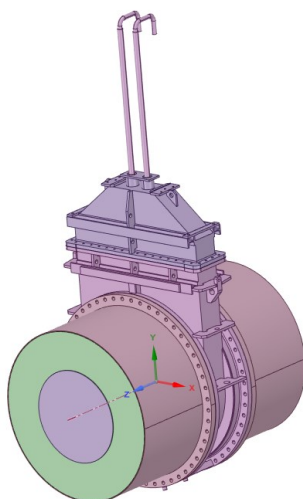
Spojením robustnosti a přesnosti modelu $k - \omega$ v oblastech blízko stěny s modelem $k - \varepsilon$, který se používá více ve volném proudění dále od stěn, vznikla metoda $k - \omega$ SST. Toto spojení dvou metod dohromady bylo realizováno prostřednictvím konvertace modelu $k - \varepsilon$ do formulace $k - \omega$. U této metody jsou používány oba modely zároveň a násobeny funkcí, která je rovna jedné blízko stěny, po té dojde k aktivaci modelu $k - \omega$, a nule daleko od stěny, což aktivuje transformovaný model $k - \varepsilon$. Tyto vlastnosti a modifikace dělají model SST přesnější a spolehlivější pro širší škálu proudění oproti standartnímu modelu. [6]

4. Aplikace matematického modelu na proudění horkovzdušným šoupátkem

Hlavním cíle diplomové práce bylo komplexní řešení proudění horkého vzduchu s chladicí kapalinou a přestupem tepla v horkovzdušném šoupátku. Nejdříve bylo nutné upravit model, tak aby byl vhodný k vytvoření výpočetní sítě. Po té byly definovány fyzikální vlastnosti použitých materiálů a nakonec definovány okrajové podmínky.

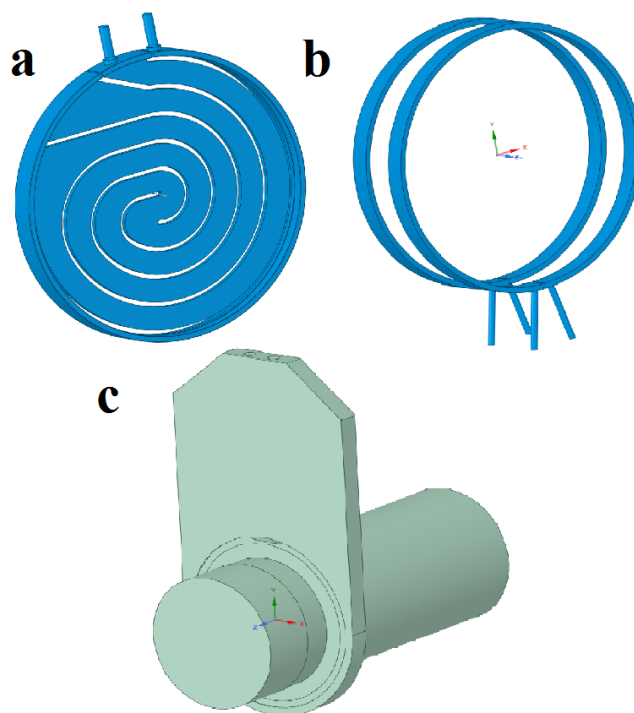
4.1 Model horkovzdušného šoupátka

Zdrojový 3D model horkovzdušného šoupátka byl dodán firmou Armatury Group a.s., která diplomovou práci zadávala. Model byl zaslán ve formátu STEP. Zdrojový model je znázorněn na Obr. 4.1. Pro následné potřeby numerického modelování proudění bylo nutné model vhodně upravit. Úprava byla provedena v programu ANSYS Spaceclaim.



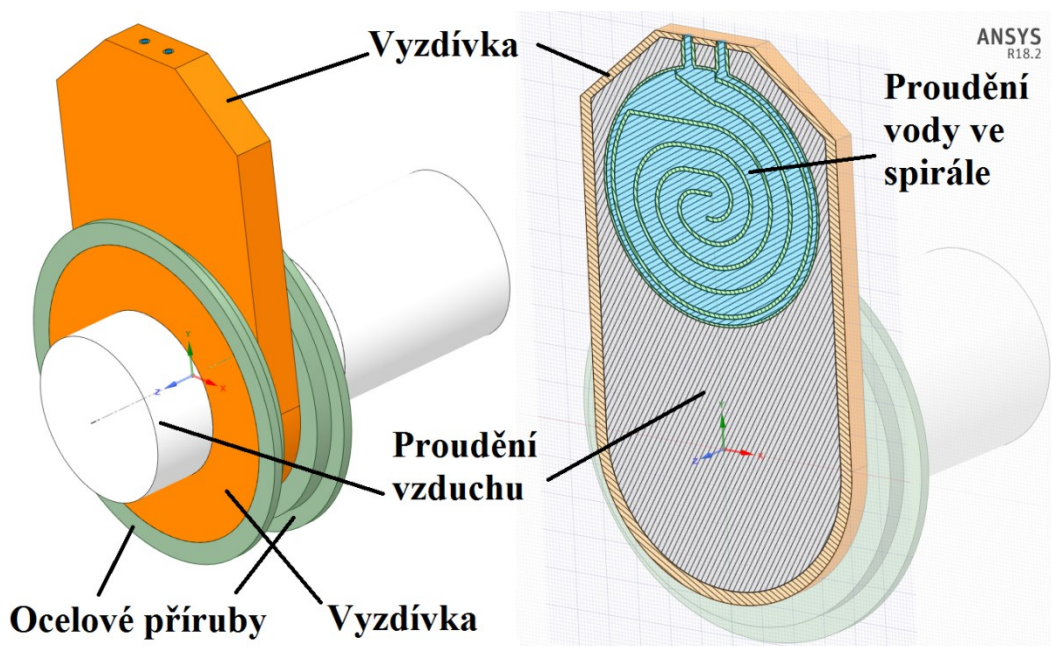
Obr. 4.1 Zdrojový 3D model

S ohledem na přítomnost řady detailů, bylo nutné tento původní model upravit do podoby, která byla vhodná pro následné generování výpočetní sítě a matematické modelování. Veškeré zaoblení, díry pro šrouby, nebo taky žebra na ocelovém krytu byly potlačeny. Dále byly potlačeny také veškerá těsnění a izolace. Bylo nutné vytvořit objemy jednotlivých oblastí proudění, ať už proudění vody v chladicí spirále, které je uvedeno na Obr. 2.8, nebo proudění vody v chladicích obvodových kanálcích, které je uvedeno na Obr. 2.9, nebo proudění horkého vzduchu, jelikož v původním modelu nebyly tyto objemy definované. Výsledné objemy proudění tekutin jsou vyobrazeny na Obr. 4.2. Obdobným způsobem byly vytvořeny objemy vyzdívek a ocelových částí.

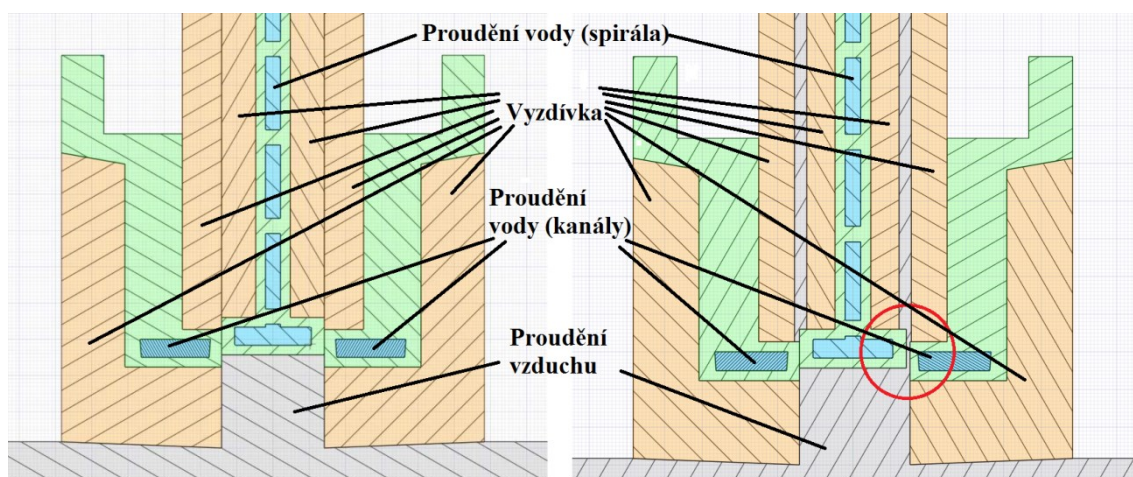


Obr. 4.2 Vytvořené objemy oblastí proudění (a – proudění vody v chladicí spirále, b – proudění vody v chladicích obvodových kanálcích, c - proudění horkého vzduchu)

Kromě zaoblení a jiných členitých tvarů tohoto modelu, byl potlačen také jeho ocelový kryt. Dále bylo prodlouženo potrubí pro proudění horkého vzduchu o jeden metr z důvodu ustálení proudění. Po detailních úpravách byl vytvořen upravený model, který byl vhodný pro vygenerování výpočetní sítě. Tento upravený model je vyobrazen níže na uvedených obrazech. Model je vyobrazen jak z prostorového pohledu, tak z příčného řezu na Obr. 4.3.



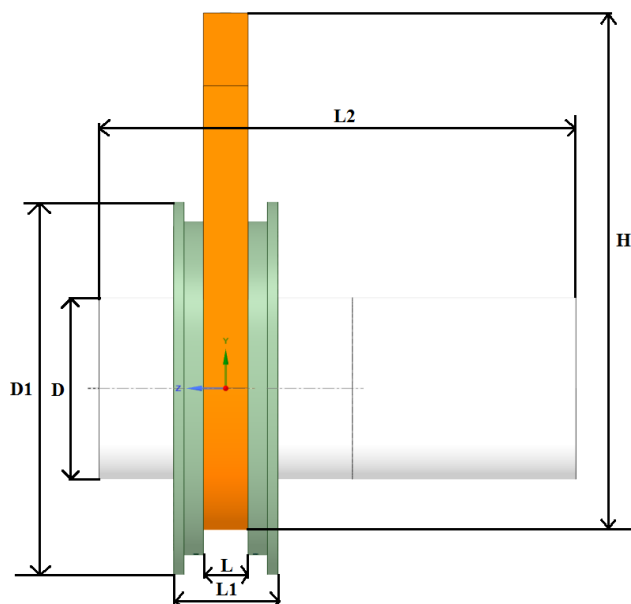
Obr. 4.3 Výsledný 3D model a jeho příčný řez



Obr. 4.4 Vyobrazení příčného řezu modelu bez mezery (vlevo) a s mezerou (vpravo)

Byly navrženy dva výpočetní modely a to s mezerou mezi ocelovým talířem a ocelovou přírubou a bez mezery. V mezeře proudí horký vzduch. Tyto dva modely jsou v příčném řezu zobrazeny na Obr. 4.4.

Dále byly v programu ANSYS Spaceclaim vyhodnoceny základní rozměry výsledného modelu horkovzdušného šoupátka, průměry jednotlivých vstupů a výstupů pro proudící média, které budou využity pro následující definování okrajových podmínek. Tyto základní rozměry a jejich hodnoty jsou uvedeny na Obr. 4.5 a v Tab. 4.1.



Obr. 4.5 Základní rozměry pro upravený model

Označení	[-]	D	D ₁	L	L ₁	L ₂	H
Hodnota	[mm]	1200	2500	300	700	3200	3647

Tab. 4.1 Hodnoty základních rozměrů výsledného modelu

Jak je výše popsáno, určeny byly také průměry vstupů a výstupů v oblasti chladicí spirály a chladicích obvodových kanálů. Tyto rozměry jsou uvedeny v Tab. 4.2.

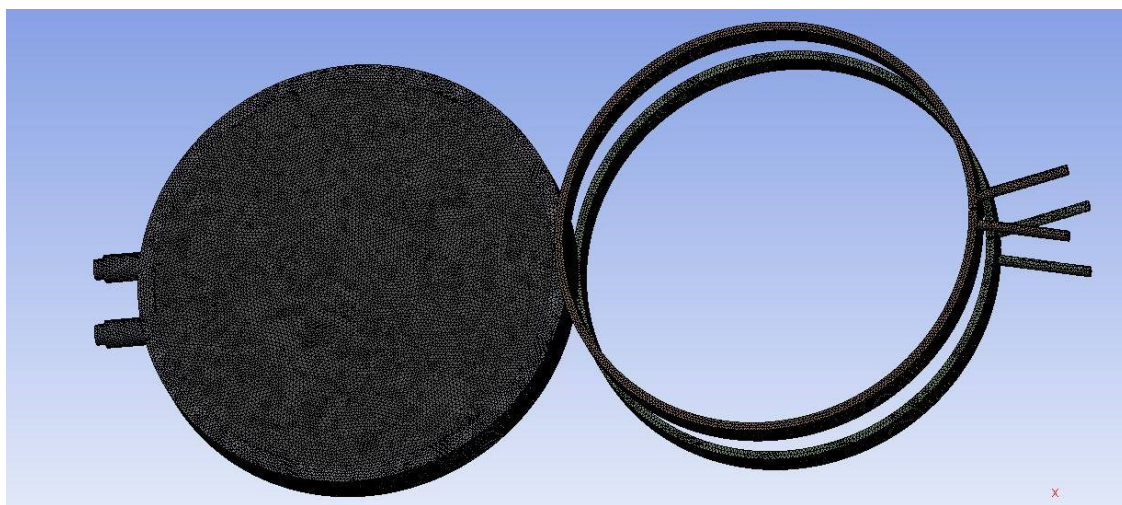
průměr vstupu/výstupu - chladicí spirála	49	[mm]
Průměr vstupu/výstupu - obvodové chladicí kanály	40	[mm]

Tab. 4.2 Hodnoty průměrů vstupů a výstupů pro oblasti proudění medií

4.2 Tvorba výpočetní sítě

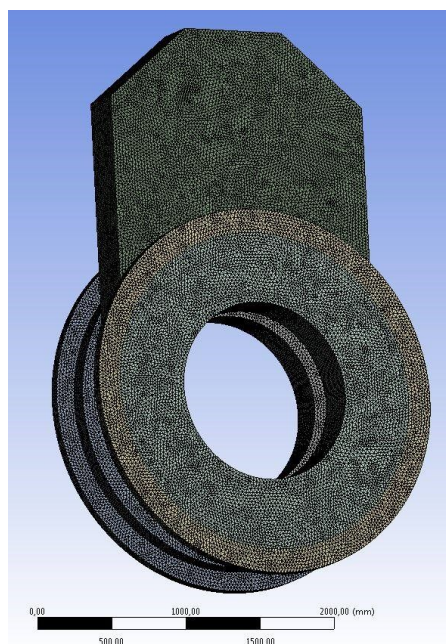
Výpočetní síť byla tvořena v programu ANSYS Meshing. Z důvodu složitosti členitosti geometrie modelu horkovzdušného šoupátka bylo nutné definovat velikost a typ elementu výpočetní sítě pro jednotlivé oblasti individuálně. Protože některé typy elementů na komplikovanější tvary nešly definovat. Ve výsledném modelu pro všechny oblasti a objemy byly definovány čtyřstěny.

Velikosti buněk výpočetní sítě byly nastaveny individuálně pro každý objem. Pro oblasti proudění chladicí vody ve spirále a obvodových kanálech, ve kterých proudí chladicí voda spolu s vyzdívkou na obou stranách, byla velikost buňky nastavena na 12 mm. Tato výpočetní síť je zobrazena na Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Výpočetní síť s velikostí buněk 12 mm

Buňky výpočetní sítě v těchto objemech měly velikost 12 mm z důvodu jemnější sítě v oblasti proudění chladicí vody. Výpočetní síť s velikostí buněk 22 mm byly nastaveny pro dvě ocelové příruby a jejich vyzdívky a kryt vyzdívky. Všechny tyto objemy s velikostí buněk 22 mm jsou vyobrazeny na Obr. 4.7.



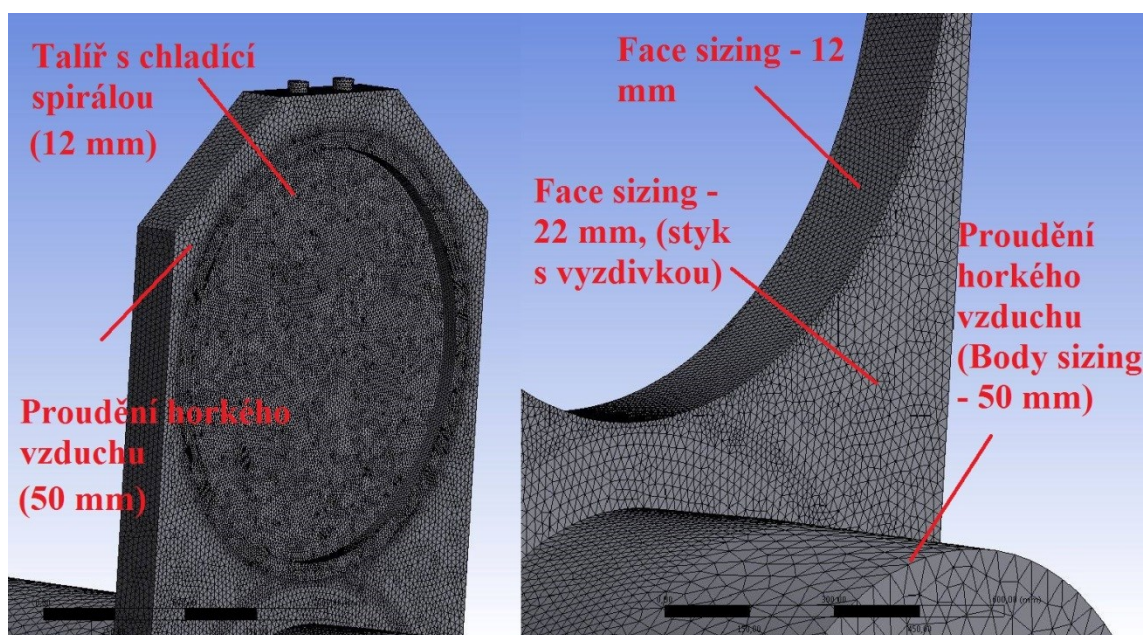
Obr. 4.7 Výpočetní síť s velikostí buněk 22 mm

Výpočetní síť v objemech proudění vzduchu byla definována s velikostí buněk 50 mm. S tím, že v místě kontaktu s okolními oblastmi měly buňky menší velikost. Tento objem je uveden na Obr. 4.8.



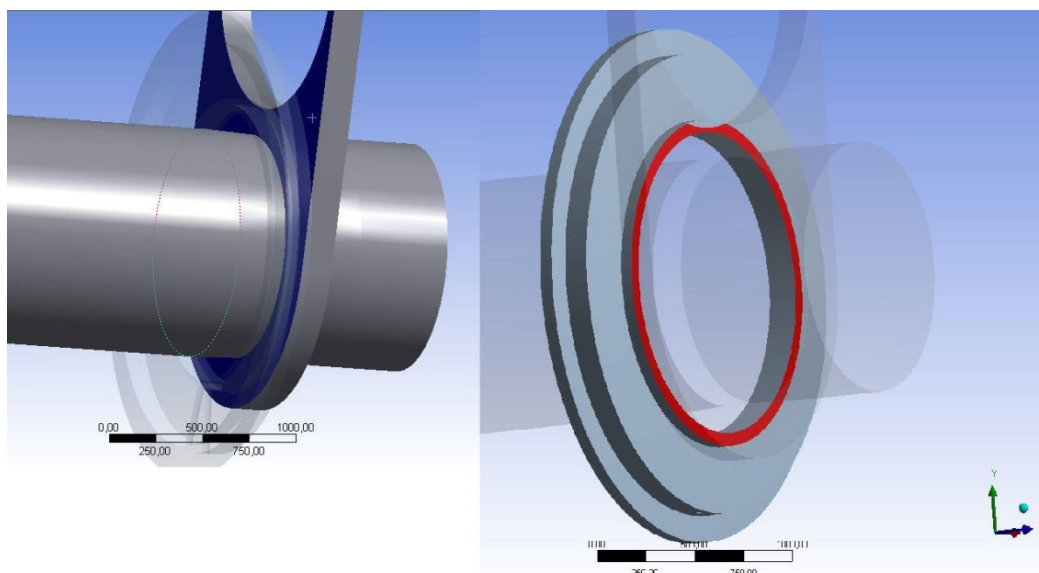
Obr. 4.8 Výpočetní síť s velikostí buněk 50 mm

S ohledem na následné výpočty v prostředí ANSYS Fluent bylo nutné, aby výpočetní síť v kontaktech mezi objemy na sebe navazovala. Toto navazování nebylo vytvořeno automaticky, z tohoto důvodu bylo nutné vytvořit síť na všech styčných plochách jednotlivých objemů. Jedna z podmínek vytvoření identické sítě na styčných plochách objemů je, aby jednotlivé styčné plochy jednoho objemu měly stejnou velikost buněk. Například objem proudění horkého vzduchu „omývá“ ocelový talíř, ve kterém proudí chladicí voda. Tento talíř má velikost buněk 12 mm, proudění horkého vzduchu má velikost buněk 50 mm, proto bylo nutné na styčné ploše objemu horkého vzduchu s talířem definovat plošné síťování s velikostí buněk 12 mm. Tyto úpravy jsou uvedeny na obrázku Obr. 4.9.



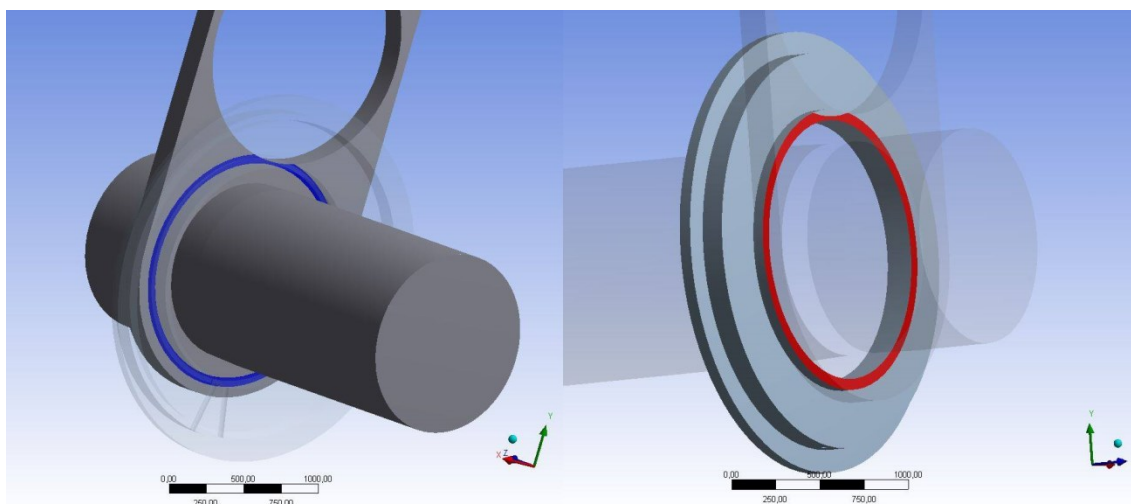
Obr. 4.9 Aplikace „face sizing“

Dalším krokem před vytvořením kontaktů na styčných plochách bylo přesné definování styčných ploch. Tato operace může být prováděna automaticky. Jako příklad je uveden na Obr. 4.10 (barevné označení) kontakt objemu ocelové příruby s objemem proudění horkého vzduchu. Z výsledků je patrné, že kontakty nebyly vytvořeny přesně. Přesného výběru se docílilo manuálně.



Obr. 4.10 Automatické vytvoření kontaktů (styk ocelové příruby s prouděním horkého vzduchu)

Jak lze na Obr. 4.10 pozorovat automatické vytvoření kontaktu nesedí s reálným kontaktem mezi těmito dvěma objemy. Tyto dva objemy mají mít mezi sebou kontakt v podobě mezikruží s malým vykrojením nahoře. Po automatickém vytvoření kontaktu lze z Obr. 4.10 Automatické vytvoření kontaktů (styk ocelové příruby s prouděním horkého vzduchu) vyzorovat, že není tento kontakt definován správně. Výběr ploch při tvorbě kontaktů se musel provést manuálně v programu ANSYS Spaceclaim. Výsledná podoba je patrná z Obr. 4.11. Všechny tyto změny byly provedeny pro všechny kontakty, které nebyly vygenerovány automaticky správně.

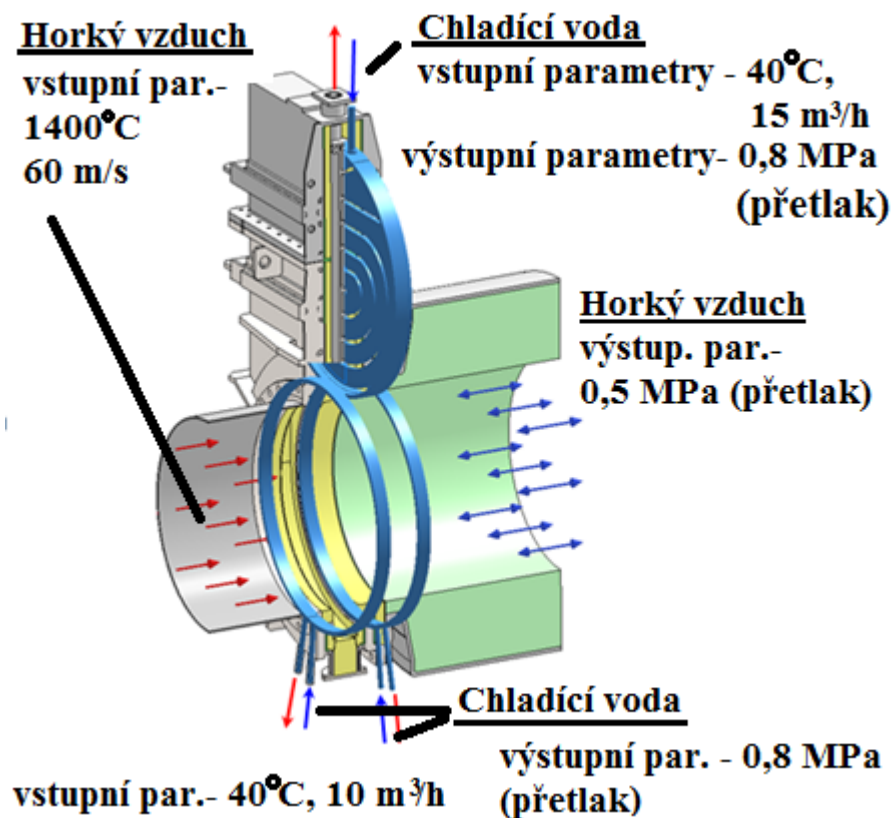


Obr. 4.11 Styčné plochy po manuální úpravě (styk ocelové příruby s prouděním horkého vzduchu)

Po těchto úpravách všech kontaktů byly splněny podmínky pro síťování a následně byla vytvořena výsledná výpočetní síť na jejich styčných plochách pomocí příkazů „mesh edit“ a „contact match“. Dále byly v programu ANSYS Meshing pojmenovány také všechny okrajové podmínky.

4.3 Definice okrajových podmínek.

Důležitou součástí numerického modelování jsou okrajové podmínky. Okrajové podmínky je nutno definovat co nejpřesněji. Přesné hodnoty okrajových podmínek lze stanovit například experimentálně. V tomto případě byly okrajové podmínky definovány zadavatelem diplomové práce.



Obr. 4.12 Přehled okrajových podmínek pro proudění horkého vzduchu a chladicí vody

Nejdříve byly zadány vstupní okrajové podmínky pro oblasti proudění. Na vstupu chladicí vody do spirály, do obvodových chladicích kanálů a vstupu horkého vzduchu. Byly nastaveny průtokové okrajové podmínky, pomocí hmotnostního průtoku (mass flow inlet), který byl definován ze vstupních údajů od zadavatele diplomové práce.

- Výpočet vstupního hmotnostního průtoku pro vstup chladicí vody do spirály

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \Rightarrow Q_m = Q_v \cdot \rho = 0,004166 \cdot 1000 = 4,166 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.1)$$

kde:

Q_v	- objemový průtok	15	$[\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$	0,004166	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
ρ	- hustota vody	1000	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$		
Q_m	- hmotnostní průtok		$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$		

- Výpočet vstupního průtoku pro vstup chladicí vody do obvodových kanálů

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \Rightarrow Q_m = Q_v \cdot \rho = 0,002777 \cdot 1000 = 2,778 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.2)$$

kde:

Q_v	- objemový průtok	10	$[\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$	0,002777	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
ρ	- hustota vody	1000	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$		
Q_m	- hmotnostní průtok		$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$		

- Výpočet vstupního hmotnostního průtoku pro vstup horkého vzduchu do horkovzdušného šoupátka

Nejdříve byl proveden výpočet hustoty vzduchu při daných teplotních a tlakových podmínkách přes stavovou rovnici.

$$p_{abs} = \frac{\rho}{M} \cdot T_{abs} \cdot R \Rightarrow \rho = \frac{p_{abs} \cdot M}{T_{abs} \cdot R} = \frac{601325 \cdot 0,02896}{1673,15 \cdot 8,31432} = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.3)$$

kde:

p_{abs}	- absolutní tlak	601325	$[\text{Pa}]$
M	- molární hmotnost	0,02896	$[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$
R	- univerzální plynová konstanta	8,31432	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
T_{abs}	- absolutní teplota	1673,15	$[\text{K}]$
ρ	- hustota vzduchu		$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$Q_v = u \cdot S = 60 \cdot 1,17 = 70,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.4)$$

kde:

u	- rychlost	60	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
S	- vstupní plocha	1,17	$[\text{m}^2]$
Q_v	- objemový průtok		$[\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = 70,2 \cdot 1,25 = 87,75 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.5)$$

kde:

Q_m	- hmotnostní průtok		$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
-------	---------------------	--	-----------------------------------

Následně bylo nutné definovat intenzitu turbulence, hydraulický průměr a vstupní teplotu proudícího média.

Po vstupních veličinách byly definovány výstupní parametry pro oblasti proudění. Okrajové podmínky na výstupech byly definované jako tlakové (pressure outlet) s definovaným přetlakem. Po definici přetlaku následovala definice intenzity turbulence a hydraulického průměru.

V posledním kroku byly nastaveny teplotní okrajové podmínky na pevných stěnách pomocí konvekce, s definovaným součinitelem přestupu tepla (α) a teplotou okolí ($T_{okolí}$). Okrajové podmínky byly definovány na stěnách v přímém kontaktu s okolním vzduchem. Parametry všech okrajových podmínek jsou uvedeny v Tab. 4.3.

Okrajové podmínky				
Plocha/objem	Veličina	Značka	Velikost	Jednotka
Vstup-vzduch	Hmotnostní průtok	Q_m	90	$[kg \cdot s^{-1}]$
	Intenzita turbulence		1	$[\%]$
	Hydraulický průměr	d_h	1,2	$[m]$
	Vstupní teplota	$T_{vstup\ vzduch}$	1673,15	$[K]$
Vstup-spirála	Hmotnostní průtok	Q_m	4,16	$[kg \cdot s^{-1}]$
	Intenzita turbulence		1	$[\%]$
	Hydraulický průměr	d_h	0,049	$[m]$
	Vstupní teplota	$T_{vstup\ spirála}$	313,15	$[K]$
Vstup-obvodový kanál	Hmotnostní průtok	Q_m	2,77	$[kg \cdot s^{-1}]$
	Intenzita turbulence		1	$[\%]$
	Hydraulický průměr	d_h	0,04	$[m]$
	Vstupní teplota	$T_{vstup\ obvodovy\ kanál}$	313,15	$[K]$
Výstup-vzduch	Tlak (přetlak)	p	0,5	$[MPa]$
	Intenzita turbulence		1	$[\%]$
	Hydraulický průměr	d_h	1,2	$[m]$
Výstup-spirála	Tlak (přetlak)	p	0,8	$[MPa]$
	Intenzita turbulence		1	$[\%]$
	Hydraulický průměr	d_h	0,049	$[m]$
Výstup-obvodový kanál	Tlak (přetlak)	p	0,8	$[MPa]$
	Intenzita turbulence		1	$[\%]$
	Hydraulický průměr	d_h	0,04	$[m]$
Stěny v kontaktu s okolním vzduchem	Konvekce			
	Teplota okolí	$T_{okolí}$	303,15	$[K]$
	Součinitel přestupu tepla	α	15	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

Tab. 4.3 Přehled okrajových podmínek

4.4 Charakteristika materiálových vlastností

V této kapitole byly stanoveny fyzikální vlastnosti proudících médií (voda a vzduch) a pevných materiálů (ocel a vyzdívka).

- **Vzduch (air)** – hustota (ρ) a kinematická viskozita (ν) byla definována konstantní hodnotou odpovídající parametrům vzduchu při 1400 °C, které jsou uvedeny v Tab. 4.4. Tepelná kapacita (c_p) a tepelná vodivost (λ) byly definovány jako teplotně závislé pomocí funkce po částech lineární. Hodnoty těchto teplotně závislých parametrů byly čerpány z tabulek [11].

Konstantní veličiny	Označení	Hodnota	Jednotka
Hustota	ρ	1,25	$[kg \cdot m^{-3}]$
Kinematická viskozita	ν	1.7894e-05	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

Tab. 4.4 Přehled vlastností zadaných konstantou [11]

- **Voda (water – liquid)** – hustota (ρ) a kinematická viskozita (ν) byly definovány konstantní hodnotou. Tepelná kapacita (c_p) a tepelná vodivost (λ) byly definovány jako teplotně závislé pomocí funkce po částech lineární. Hodnoty těchto teplotně závislých parametrů byly definovány z níže uvedené Tab. 4.5.

t °C	c_p J kg ⁻¹ K ⁻¹	λ W m ⁻¹ K ⁻¹
0	4,229	0,561
10	4,188	0,580
20	4,183	0,5984
30	4,183	0,6154
40	4,182	0,6305
50	4,182	0,6435
60	4,183	0,6543
70	4,187	0,6631
80	4,194	0,670
90	4,204	0,6753
100	4,217	0,6791
110	4,232	0,6817
120	4,249	0,6832
130	4,267	0,6837
140	4,288	0,6833

Tab. 4.5 Přehled fyzikálních vlastností vody při různých teplotách [8]

- **Ocel (steel)** – fyzikální vlastnosti oceli (tepelná kapacita (c_p) a tepelná vodivost (λ)) byly dodány od zadavatele diplomové práce jako teplotně závislé. Hodnoty nebyly definovány pro každou teplotu, proto byly chybějící hodnoty dohledány z jiného zdroje. Finální podoba teplotně závislých parametrů je uvedena v Tab. 4.6. Tučně jsou uvedeny hodnoty převzaté z jiného zdroje. Hustota byla zadána pomocí konstantní hodnoty ($\rho = 7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Ocel			
Teplota t [°C]	Měrné teplo c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Teplota t [K]
0	440	51,9	273,15
100	495	52	373,15
200	536	48	473,15
300	590	46	573,15
400	677	43,1	673,15
600	770	37	873,15
800	842	25,9	1073,15
1000	649	27,7	1273,15
1200	674	29,8	1473,15
1400	687	31	1673,15

Tab. 4.6 Přehled fyzikálních vlastností oceli při různých teplotách [1,9]

- **Vyzdívka (copelit)** – byla definována konstantní hodnotou hustoty ($\rho = 2150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a teplotně závislými parametry (tepelnou kapacitou (c_p) a tepelnou vodivostí (λ)). Všechny tyto parametry byly zaslány zadavatelem diplomové práce, tudíž nebylo nutné další data vyhledávat. Hodnoty teplotně závislých fyzikálních veličin jsou uvedeny v Tab. 4.7.

Vyzdívka			
teplota t [°C]	měrné teplo c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	teplota t [K]
0	960	0,8141	273,15
300	1050	0,8839	573,15
400	1115	0,9071	673,15
600	1178	0,8723	873,15
800	1235	0,9304	1073,15
1000	1271	0,9886	1273,15
1200	1294	1,0351	1473,15
1400	1320	1,07	1673,15

Tab. 4.7 Přehled fyzikálních vlastností vyzdívky při různých teplotách [1]

Po nastavení všech materiálů se přechází na definování oblastí proudění medií a oblastí s pevným materiálem. Toto nastavení je nutné provést pro všechny objemy.

Výpočet Reynoldsova čísla pro oblastí proudění

- V oblasti proudění vody v chladicí spirále

$$Q_v = S \cdot u \Rightarrow u = \frac{Q_v}{S} = \frac{0,004166}{0,0019} = 2,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.6)$$

kde:

Q_v - objemový průtok 15 [m³·hod⁻¹] 0,004166 [m³·s⁻¹]

S - plocha 0,0019 [m²]

$$Re = \frac{u \cdot d_h}{\nu} = \frac{2,19 \cdot 0,049}{0,000000658} = 163085 \quad (4.7)$$

kde:

u - střední rychlost 2,19 [m·s⁻¹]

d_h - hydraulický průměr 49 [mm] 0,049 [m]

ν - kinematická viskozita vody 0,658·10⁻⁶ [m²·s⁻¹]

- V oblasti proudění vody v obvodovém chladicím kanále

$$Q_v = S \cdot u \Rightarrow u = \frac{Q_v}{S} = \frac{0,002777}{0,00106} = 2,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.8)$$

kde:

Q_v	- objemový průtok	10	$[\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$	0,002777	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
S	- plocha	0,00106	$[\text{m}^2]$		

$$Re = \frac{u \cdot d_h}{\nu} = \frac{2,62 \cdot 0,04}{0,000000658} = 159271 \quad (4.9)$$

kde:

u	- střední rychlost	2,62	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$		
d_h	- hydraulický průměr	40	$[\text{mm}]$	0,040	$[\text{m}]$
ν	- kinematická viskozita vody	$0,658 \cdot 10^{-6}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$		

- V oblasti proudění horkého vzduchu

$$Re = \frac{u \cdot d_h}{\nu} = \frac{60 \cdot 1,2}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 4023695 \quad (4.10)$$

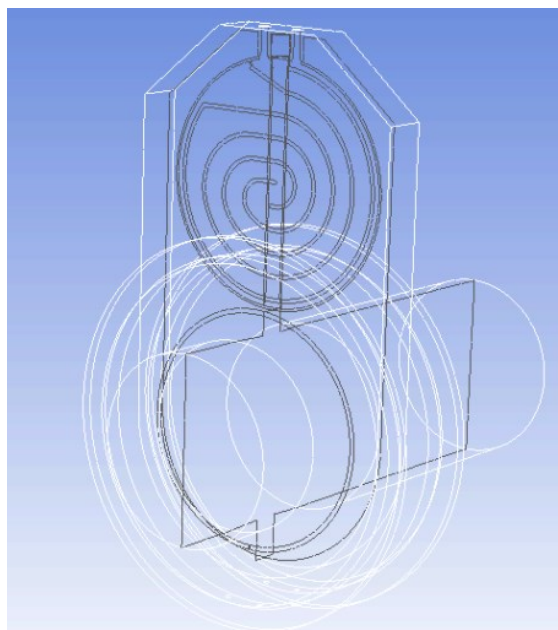
kde:

u	- střední rychlost	60	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$		
d_h	- hydraulický průměr	1,2	$[\text{m}]$		
ν	- kinematická viskozita vzduchu	$1,7894 \cdot 10^{-5}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$		

Z důvodu vysokých Reynoldsových čísel byl zvolen model turbulence $k - \varepsilon$ standart. S ohledem na složitost proudících medií a citlivost výpočtu, bylo v první fázi definováno izotermní proudění (při konstantní teplotě). Po dosažení konvergence byla definována rovnice energie a proudění bylo řešeno jako neizotermní. Výpočet byl řešen komplexně.

4.5 Vyhodnocení matematického modelování

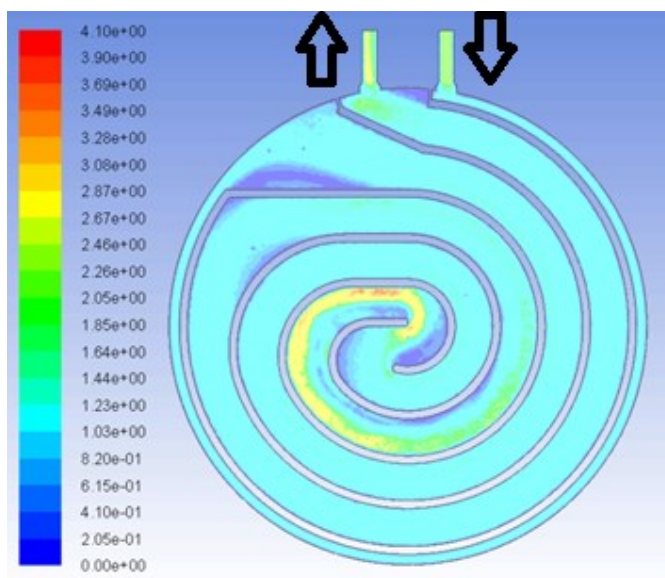
Vyhodnocovány byly základní proudové veličiny (rychlost – u , teplota – T) v jednotlivých oblastech. Výsledky byly následně prezentovány v příslušných řezech, které jsou uvedeny na Obr. 4.13. Nejdříve je provedeno vyhodnocení pro variantu modelu s mezerou (horký vzduch proudí kolem celého šoupátka (talíře)). Následně budou zhodnoceny varianty (bez uvažování mezery a s uvažováním mezery, viz Obr 4.4).



Obr. 4.13 Zobrazení řezů k vyhodnocení

- **Vyhodnocení rychlostí proudového pole v jednotlivých oblastech proudění**

V první fázi jsou vyhodnoceny kontury rychlosti pro oblast proudění vody v chladicí spirále. Rychlost ve středu spirály dosahuje svého maxima, a to $\approx 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato maximální rychlost se ve středu spirály vyskytuje z důvodu zúžení průřezu průtočné plochy. Na Obr. 4.14 lze pozorovat, že rychlost na vstupu a na výstupu dosahuje přibližně stejných hodnot. Dále byly vyhodnoceny střední hodnoty rychlosti na vstupu a výstupu, které jsou uvedeny v Tab. 4.8.

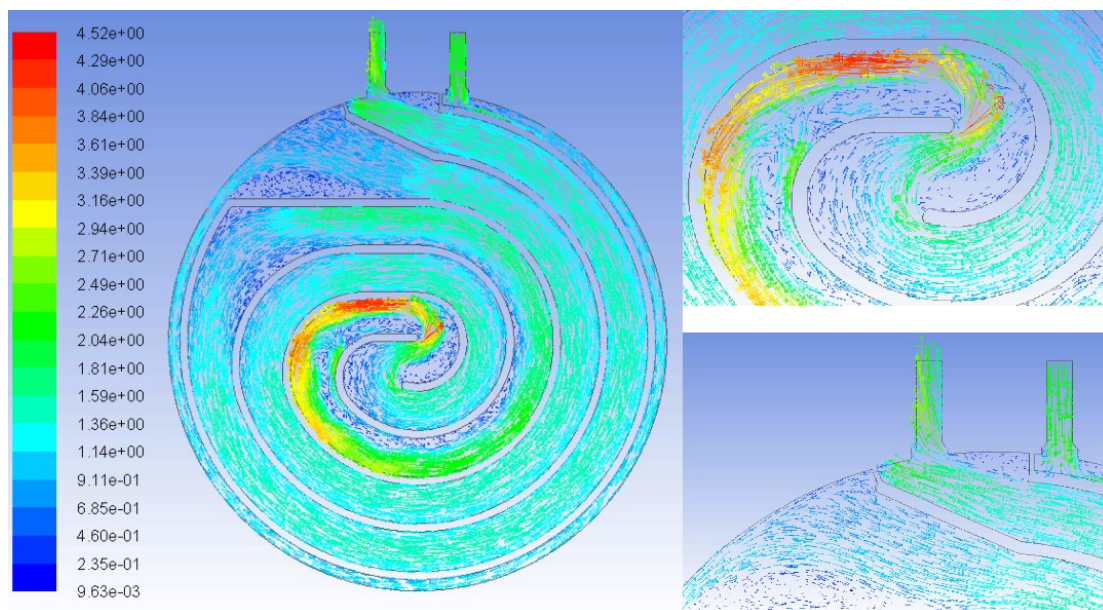


Obr. 4.14 Kontury rychlosti $u \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$ v oblasti proudění chladicí vody spirálou

Označení	Hodnota	Jednotka
$u_{\text{vstup spirála}}$	2,208	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$u_{\text{výstup spirála}}$	2,201	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$

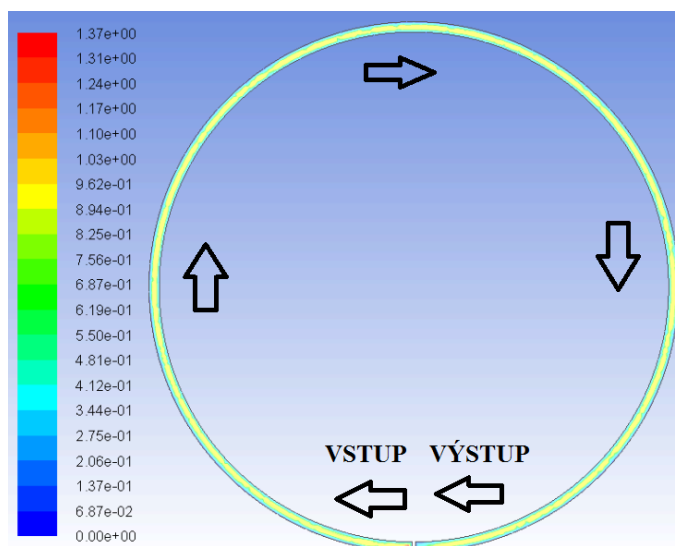
Tab. 4.8 Střední hodnoty vstupní a výstupní rychlosti

Na Obr. 4.15 jsou zobrazeny vektory rychlosti pro oblast proudění chladicí vody spirálou. Na obrázku je zobrazen hlavní pohled, detail na střed spirály a detail na vstup a výstup spirály. Z vyhodnocené pomoci vektorů rychlosti lze pozorovat, že v některých oblastech dochází k zavíření.



Obr. 4.15 Vektory rychlosti u [$m \cdot s^{-1}$] v oblasti proudění vody spirálou

V další fázi jsou vyhodnoceny kontury rychlosti pro oblast proudění vody v chladicích obvodových kanálech, které jsou vyobrazeny na Obr. 4.16. Rychlost v obvodových kanálech je rovnoměrná. Dále byly vyhodnoceny střední hodnoty vstupní a výstupní rychlosti, které jsou uvedeny v Tab. 4.9.



Obr. 4.16 Kontury rychlosti u [$m \cdot s^{-1}$] v oblasti proudění chladicí vody v obvodových kanálech

Označení	Hodnota	Jednotka
$u_{\text{vstup obvodový kanál}}$	2,620	$[m \cdot s^{-1}]$
$u_{\text{výstup obvodový kanál}}$	2,740	$[m \cdot s^{-1}]$

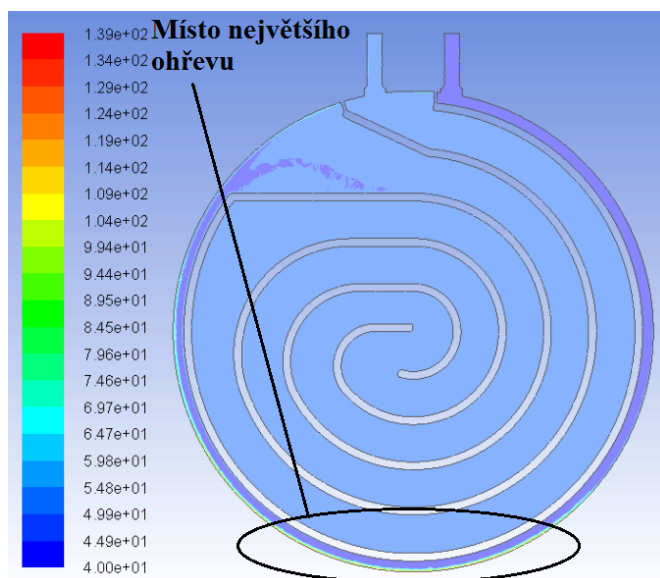
Tab. 4.9 Střední hodnoty vstupní a výstupní rychlosti

4.18 je zobrazeno vyhodnocení vektorů rychlosti v příčném

46

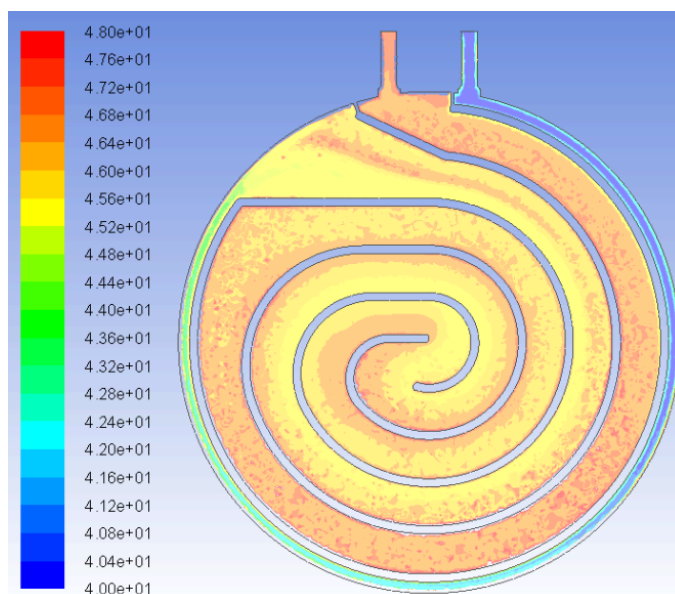
- **Vyhodnocení teplotního pole v jednotlivých oblastech proudění**

U proudění chladicí vody ve spirále byly vyhodnoceny kontury teploty, které dosahovaly hodnot v rozsahu od 40 do 141 °C, viz Obr. 4.19. Z vyhodnocených kontur teplot lze pozorovat, že dochází k místnímu ohřívání na dně spirály, kde se vyskytuje největší teplota. Toto místo odpovídá přímému kontaktu s horkým vzduchem, který má v tomto místě největší teplotu, což odpovídá skutečnosti.



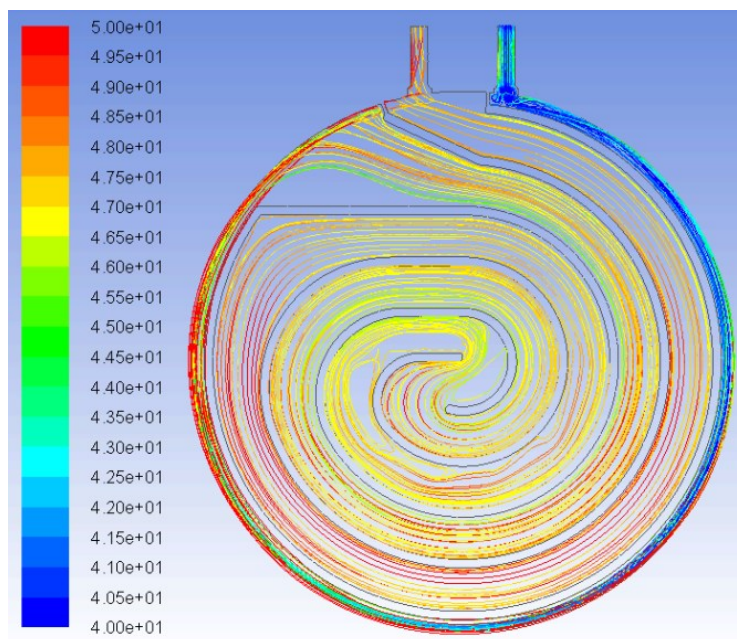
Obr. 4.19 Kontury teploty $T [^{\circ}\text{C}]$ v oblasti proudění chladicí vody spirálou

Z hlediska detailního vyhodnocení byl rozsah upraven na hodnoty od 40 do 48 °C. Z Obr. 4.20 je zřejmé, že dochází k postupnému ohřívání chladicí vody od vstupu do výstupu.



Obr. 4.20 Kontury teploty $T [^{\circ}\text{C}]$ v oblasti proudění chladicí vody spirálou

Vyhodnoceny byly také trajektorie obarveny velikostí teploty, které byly definovány v rozsahu od 40 do 50 °C a jsou uvedeny na Obr. 4.21.



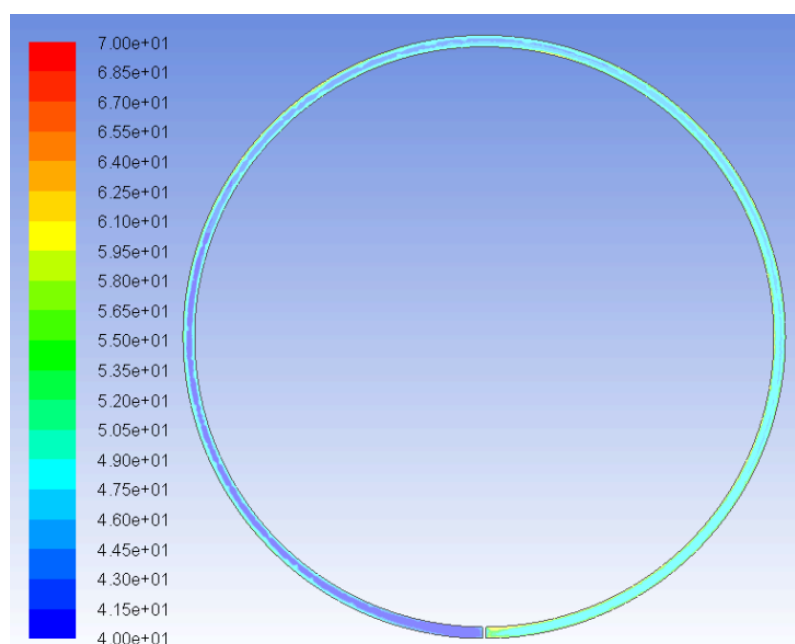
Obr. 4.21 Trajektorie teploty $T [^{\circ}\text{C}]$ v oblasti proudění spirálou

Na závěr byly vyhodnoceny střední hodnoty vstupní a výstupní teploty a teplotní spád. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.10.

Označení	Hodnota	Jednotka
$T_{\text{vstup spirála}}$	39,99	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{výstup spirála}}$	47,14	$[^{\circ}\text{C}]$
ΔT	7,15	$[^{\circ}\text{C}]$

Tab. 4.10 Střední hodnoty vstupní a výstupní teploty

Teplotní pole v obvodovém kanále bylo vyhodnoceno pomocí kontur teploty, které jsou uvedeny na Obr. 4.22. Rozsah teploty je od 40 do 70 $^{\circ}\text{C}$. Pro druhý obvodový kanál je vyhodnocení kontur teplotního pole obdobné.



Obr. 4.22 Kontury teploty $T [^{\circ}\text{C}]$ v oblasti proudění chladicí vody v obvodových kanálech

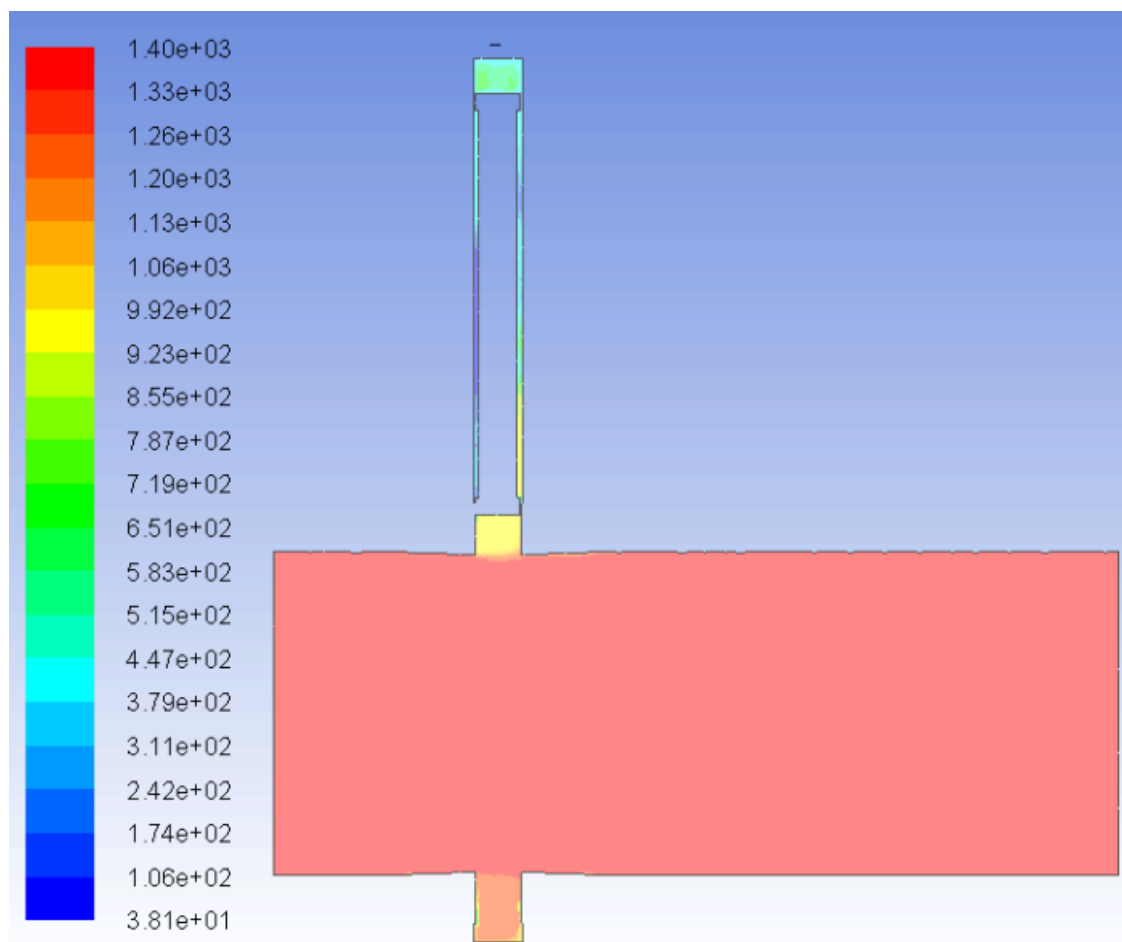
Dále byly vyhodnoceny střední hodnoty teploty na vstupech a výstupech a teplotní spády pro oba obvodové kanály. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.11.

Označení	Hodnota	Jednotka
$T_{\text{vstup obvodový kanál 1}}$	40	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{výstup obvodový kanál 1}}$	47,3	$[^{\circ}\text{C}]$
ΔT_1	7,3	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{vstup obvodový kanál 2}}$	40	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{výstup obvodový kanál 2}}$	49,3	$[^{\circ}\text{C}]$
ΔT_2	9,3	$[^{\circ}\text{C}]$

Tab. 4.11 Střední hodnoty vstupní a výstupní teploty

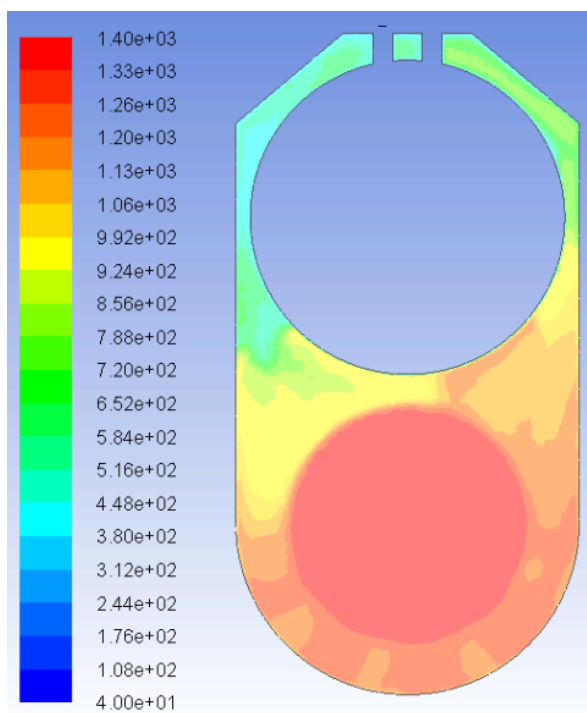
Teplotní pole v oblasti proudění horkého vzduchu bylo vyhodnoceno konturami teploty v podélném i příčném řezu. Následně byly vyhodnoceny střední hodnoty teploty na vstupu a výstupu.

Na Obr. 4.23 můžeme vidět kontury teplot v podélném řezu v rozsahu od 38 do 1400 $^{\circ}\text{C}$. Kontury teplotního pole v trubce jsou rovnoměrné a nijak výrazně se nemění. Z obrázku je patrné měnící se teplotní pole v mezeře v důsledku chlazení kolem ocelového talíře.



Obr. 4.23 Kontury teploty $T [^{\circ}\text{C}]$ v oblasti proudění horkého vzduchu

Následně byly vyhodnoceny kontury teploty v příčném řezu, které jsou vyobrazeny na Obr. 4.24. Z obrázku je zřejmé, že horký vzduch se ochlazuje kolem ocelového talíře také po jeho bočních stranách nerovnoměrně.



Obr. 4.24 Kontury teplot T [$^{\circ}\text{C}$] v oblasti proudění horkého vzduchu

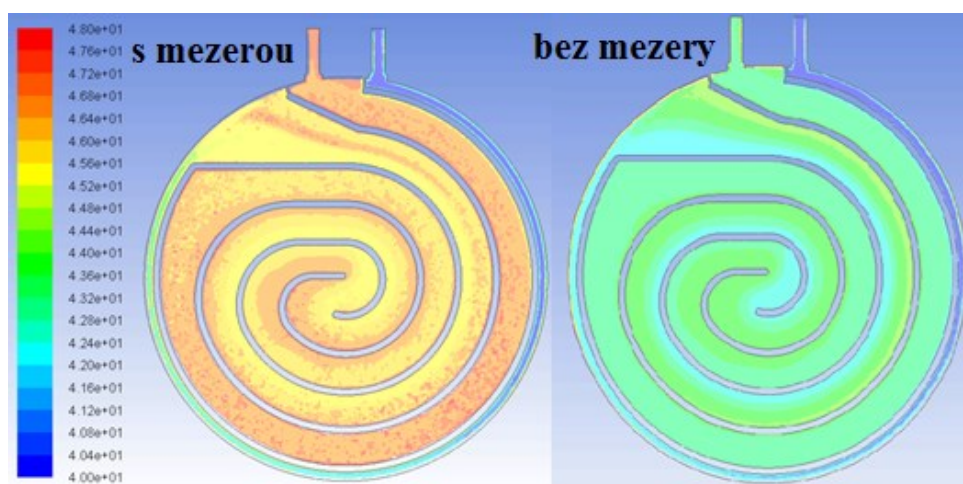
Na závěr byly vyhodnoceny střední hodnoty vstupní a výstupní teploty a teplotní spád horkého vzduchu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.12

Označení	Hodnota	Jednotka
$T_{\text{vstup vzduch}}$	1400	[$^{\circ}\text{C}$]
$T_{\text{výstup vzduch}}$	1396,18	[$^{\circ}\text{C}$]
ΔT_1	3,82	[$^{\circ}\text{C}$]

Tab. 4.12 Střední hodnoty vstupní a výstupní teploty

- Porovnání teplotního pole v případě modelu s mezerou a bez mezery**

V první fázi byly vyhodnoceny a porovnány kontury teploty pro oblast proudění vody chladicí spirálou, které jsou zobrazeny na Obr. 4.25. Na obrázku vlevo je zobrazeno teplotní pole pro model s mezerou a vpravo pro model bez mezery. Z obrázku je zřejmé, že při uvažování modelu s mezerou dojde k intenzivnějšímu ohřívání vody v chladicí spirále.



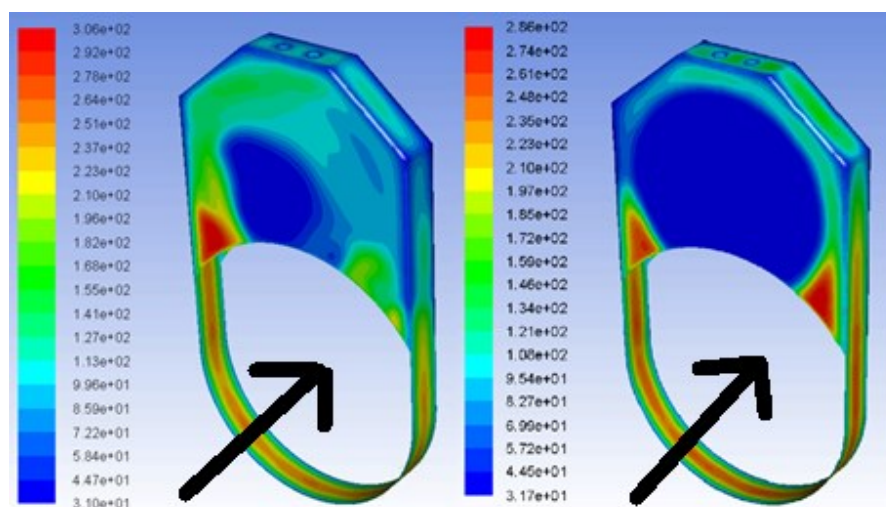
Obr. 4.25 Porovnání kontur $T [^{\circ}\text{C}]$ teplot v oblasti proudění spirálou pro dvě varianty modelu

V další fázi byly porovnány střední teploty na vstupech a výstupech a teplotní spády u jednotlivých modelů, které jsou uvedeny v Tab. 4.13. Rovněž i zde je patrný výrazný rozdíl v teplotním spádu.

Označení	Hodnota	Jednotka
$T_{\text{vstup spirála s mezerou}}$	40	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{výstup spirála s mezerou}}$	47,14	$[^{\circ}\text{C}]$
$\Delta T_{\text{spirála s mezerou}}$	7,14	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{vstup spirála bez mezery}}$	40	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{výstup spirála bez mezery}}$	43,59	$[^{\circ}\text{C}]$
$\Delta T_{\text{spirála bez mezery}}$	3,59	$[^{\circ}\text{C}]$

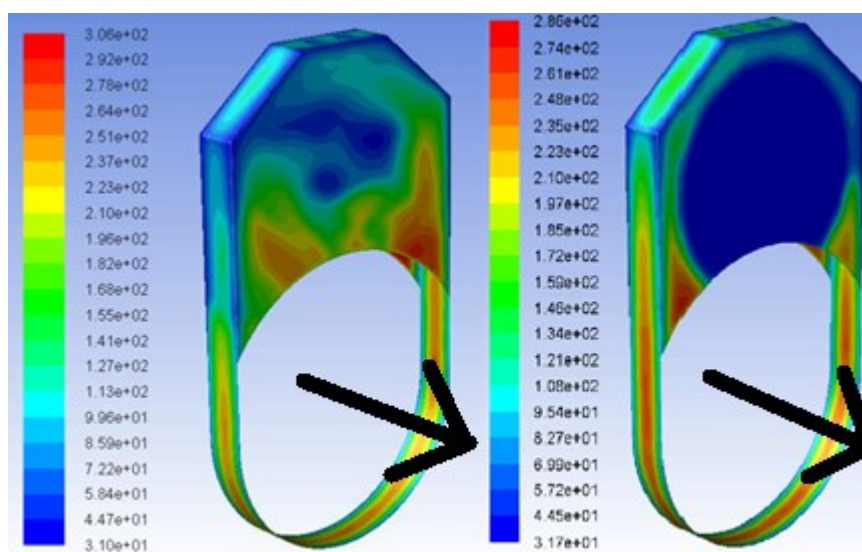
Tab. 4.13 Vstupní a výstupní střední hodnoty teploty

Dále byla vyhodnocena povrchová teplota stěn (krytu), které jsou v kontaktu s okolním vzduchem. Vyhodnocení je zobrazeno na Obr. 4.26, kde je uveden pohled zepředu. Z výsledných hodnot je zřejmé, že u varianty s mezerou dochází k intenzivnějšímu ohřevu tělesa krytu v místě proudění horkého vzduchu.



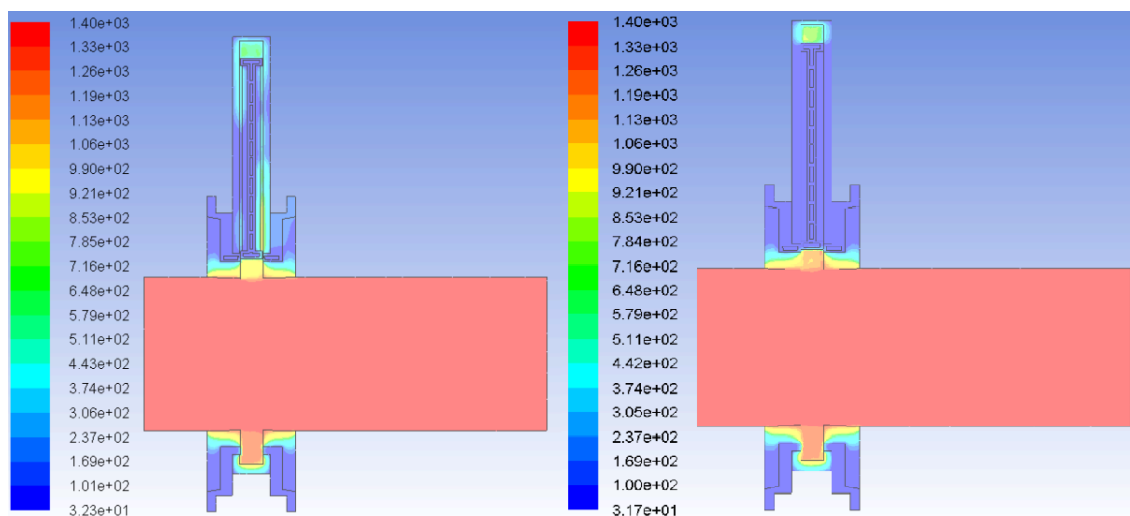
Obr. 4.26 Porovnání kontur $T [^{\circ}\text{C}]$ teploty povrchu stěn v kontaktu s okolním vzduchem pro dvě varianty modelu (vlevo varianta s mezerou, vpravo varianta bez mezery)

Na Obr. 4.27 jsou zobrazeny kontury teplot na povrchu stěn s kontaktem s okolním vzduchem ze zadního pohledu. Opět je patrný stejný závěr jako v předchozím obrázku.



Obr. 4.27 Porovnání kontur $T [^{\circ}\text{C}]$ teploty povrchu stěn v kontaktu s okolním vzduchem pro dvě varianty modelu (vlevo varianta s mezerou, vpravo varianta bez mezery)

V poslední fázi byly vyhodnoceny kontury teploty pro všechny pevné (vyzdívka, ocel) i proudící materiály (vody, vzduch). Tyto kontury byly vyhodnoceny a porovnány pro dva případy modelu, které jsou uvedeny na Obr. 4.28



Obr. 4.28 Porovnání kontur $T [^{\circ}\text{C}]$ ve všech oblastech (vlevo varianta s mezerou, vpravo varianta bez mezery)

Z Obr. 4.28 je patrný přestup tepla kolem talíře. Vlevo na obrázku je varianta s mezerou, kde lze pozorovat intenzivnější prohřívání oblasti kolem talíře.

5 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval numerickým modelováním s přestupem tepla.

Po úvodní kapitole jsem se věnoval problematice armatur. Uvedl jsem základní popis armatur a jejich rozdělení. Následně jsem se věnoval popisu hutních armatur, kde byly uvedeny také jejich základní funkce, pracovní podmínky a jejich použití v praxi. Hutní armatury jsem rozdělil do několika kategorií. Tyto kategorie jsem detailně popsal a některé z druhů hutních armatur uvedl na obrázcích. V další fázi kapitoly jsem se zabýval konkrétně horkovzdušným šoupátkem, které bylo předmětem diplomové práce. Horkovzdušné šoupátko jsem detailně charakterizoval, popsal jsem jeho funkci a uvedl použití v praxi. Popsal jsem konstrukci horkovzdušného šoupátka, včetně materiálů. Dále jsem charakterizoval druh chlazení a detailně popsal oblasti chlazení. Oblasti chlazení jsou uvedeny na obrázcích.

V další kapitole jsem se věnoval teorii numerického modelování. Byly popsány typy numerických metod, které jsou využívány při řešení proudění médií. Byly uvedeny základní rovnice a to rovnice kontinuity, Navierovy – Stokesovy rovnice a rovnice energie ve vektorovém tvaru. V další fázi jsem se věnoval turbulenci, kde bylo popsáno časové středování. Dále byly charakterizovány a rozděleny matematické modely proudění. Poslední fáze této kapitoly je věnována problematice použití turbulentních modelů v praktických aplikacích.

Další kapitola byla věnována praktické části diplomové práce a to konkrétně aplikací definovaného matematického modelu na proudění horkovzdušným šoupátkem. V první fázi čtvrté kapitoly jsem uvedl nutnou úpravu původního modelu na model, který byl vhodný ke tvorbě výpočetní sítě, z důvodu složitosti původního modelu. Potlačeny byly zaoblení, díry pro šrouby, veškeré žebra a detailní části modelu, u kterých by byl problém s vytvořením výpočetní sítě. Byly vytvořeny dva modely. První komplexní model reprezentuje proudění horkého vzduchu kolem celého talíře/šoupátka skrz mezeru, tak jak je tomu v případě reálného provozu. V druhém případě není uvažováno s mezerou a horký vzduch neproudí kolem čel talíře/šoupátka. Tyto úpravy byly provedeny v programu ANSYS Spaceclaim. Po upravení 3D modelu následovala tvorba výpočetní sítě v programu ANSYS Meshing. Vytvoření výpočetní sítě předcházely úpravy kontaktů mezi jednotlivými objemy tak, aby se shodovali s reálnými styčnými plochami. Po té byla vytvořena celková výpočetní síť včetně kontaktů. V další fázi jsem se věnoval stanovení okrajových podmínek. Vstupní

okrajové podmínky byly definovány jako průtokové pomocí hmotnostního průtoku. Hmotnostní průtok byl spočten ze vstupního objemového průtoku. Výstupní podmínky byly definovány jako tlakové pomocí přetlaku. Dále byly definovány stěnové teplotní okrajové podmínky pomocí konvekce na stěny, které jsou v kontaktu s okolním vzduchem. Následovala definice materiálových vlastností. Všechny tyto úpravy byly prováděny v programu ANSYS Fluent. Pro výpočet proudění v horkovzdušném šoupátku byla zvolena turbulentní metoda $k - \varepsilon$ standart z důvodu vysoké Reynoldsova čísla. Z důvodu citlivosti výpočtu a proudění dvou různých medií byl výpočet nejdříve prováděn bez rovnice energie. Po té byl výpočet prováděn s rovnicí energie pro dva modely s mezerou a bez mezery.

V poslední fázi této kapitoly bylo uvedeno vyhodnocení matematického modelování. Vyhodnocovány byly rychlostní a teplotní pole v jednotlivých oblastech proudění pro model s mezerou. Dále byly určeny střední hodnoty rychlosti a teploty na vstupech a výstupech jednotlivých oblastí proudění včetně teplotního spádu. Po vyhodnocení výpočtu modelu s mezerou, byl vyhodnocen výpočet modelu bez mezery. Porovnávalo bylo teplotní pole v oblasti proudění vody v chladicí spirále, povrchová teplota vnějších stěn v kontaktu s okolním vzduchem a teplotní pole přes všechny oblasti pevných i proudících materiálů. Z porovnání středních hodnot výstupní teploty v proudění vody v chladicí spirále je zřejmé, že mezera má vliv na prohřívání vody ve spirále. Střední hodnota výstupní teploty s uvažováním mezery je 47,17 °C a bez uvažování mezery je 43,59 °C. Rozdíl středních hodnot teplot na výstupech jednotlivých modelů je 3,55 °C. Tento rozdíl je způsobený proudění horkého vzduchu mezerou, kdy horký vzduch proudí kolem ocelového talíře/šoupátka po všech stranách, oproti modelu bez mezery, kde proudí horký vzduch pouze po bocích talíře /šoupátka a nedochází tak k intenzivnímu prohřívání vody ve spirále. Tento závěr platí taky pro porovnání povrchových teplot stěn v kontaktu s okolním vzduchem, kde maximální teploty u modelu s mezerou dosahují 306 °C a u modelu bez mezery dosahují 286 °C.

Další možnosti jak pokračovat ve výpočtu dané problematiky je přesnější definice 3D modelu s uvažováním všech těsnících prvků a izolačních materiálů, které by zpřesnily přestup tepla v horkovzdušném šoupátku. Další možností je modelování proudění v případě uzavřené polohy s tím, že je nutné vytvořit nový 3D model horkovzdušného šoupátka.

6 Seznam použité literatury/zdroje

- [1] Armatury Group a.s. – *online katalog*. [online]. Dostupné z: http://www.armaturygroup.cz/data/files/fa91504ac96b3aa67a71a4430d296d00_Hutni_a_specialni_armatury.pdf
- [2] MARŠÍK, František. *Numerické metody mechaniky kontinua*. Praha, 1990. ÚT AV ČR. Dostupné z: http://www.it.cas.cz/files/u1771/Num_metody_mech_kontinua.pdf
- [3] DRÁBKOVÁ, Sylva a kolektiv. *Mechanika tekutin*. Ostrava 2007. Učební text. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [4] JANALÍK, Jaroslav; ŠTÁVA, Pavel. *Mechanika tekutin*. Ostrava. Dostupné z: http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/nezarazene/Mechanika_tekutin_--VSB_Ostrava--.pdf
- [5] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava 2008. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [6] VLČEK, Petr; JIROUT Tomáš. *Modelování turbulentního proudění*. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>
- [7] Projekt: Inovace oboru mechatroniky pro Zlínský kraj. *Armatury*. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=27471&revision=-1&instance=2>
- [8] *Tabulky a grafy*. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/tabulky.pdf>
- [9] Tabulky fyzikálních vlastností, doplnit!
- [10] KOZUBKOVÁ, Milada, Tomáš BLEJCHAŘ a Marian BOJKO. *Modelování přenosu tepla hmoty a hybnosti*. Ostrava, 2011. Učební text. VŠB-TUO.
- [11] HAŠEK, Pavel. *Tabulky pro tepelnou techniku*. Ostrava 1980, 2. vydání, 247 str.
- [12] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John & Wiley Sons, 2006, p. 997

7 Seznam příloh

Příloha A – Problematika vlivu usazování vodního kamene na přestup tepla při proudění vody - tvorba geometrie a výpočetní síť

Příloha B – Problematika vlivu usazování vodního kamene na přestup tepla při proudění vody - definice okrajových podmínek

Příloha C - Problematika vlivu usazování vodního kamene na přestup tepla při proudění vody - vyhodnocení